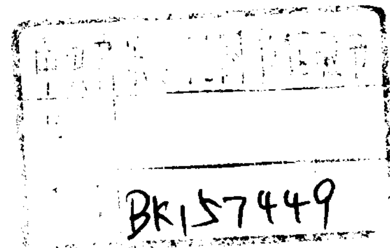


目　　录

第一章　绪论

§1.1　声学（Acoustics）的发展

1.1.1　自然界中的声音——声学的起源

在人类出现以前，自然界就早已存在着我们现在所能听到的一些声源。从远古开始，自然界中就有雷鸣、风啸，海浪、流水，山崩地裂，火山爆发。当生物出现以后，有林木摇曳，鸟语虫鸣，狼嗥狮吼，野马奔腾。自人类诞生以后，狩猎作战，行走攀登，呼叫哭笑，耕地劳作以至在劳动中发展形成的用以传达思维信息和情感的语言等等，无不会产生响动。人们要对这些作出解释，于是就产生了包括声学在内的自然科学的萌芽。例如，古埃及人对日月经天，一年中有冬夏之分就曾作出过这样的解释："'太阳船'在天河即尼罗河上每天自东向西行驶，给人类带来温暖和光明。当尼罗河泛滥时，河面变宽，于是太阳船就距我们近些，天气就变热，这就是夏天。"对于声学也是如此，人们常把声音现象与自然现象联系起来。在讨论声学的起源之前，首先要回答一个问题：什么是"声"？在声学中有一个古老的 命题：人迹罕至的原始森林里面一颗树倒下了，算不算产生了声音？

一般认为，没有人听到，就不算有声音，因为声音必须是与被人所听到联系在一起的。我国古代甲骨文中的"声"字的形状是"[illegible]"，是一个耳朵在听。声的繁体字写法是"聲"，也有一个耳朵。

由上所述，在人类诞生以前，大自然中就存在着产生声音的渊薮。当人类出现以后，自然就听到了声音。因此，声学是最古老的自然科学之一。

同其它自然科学一样，萌芽状态的声学常常与神话故事和自然现象联系在一起。而音乐又是声学现象中特别重要的一种。因此，神话传说、自然现象与音乐又常常纠合在一起。如古希腊人认为：声音来自天上，七个行星就是七弦琴的七根弦。中国古时有个传说，说黄帝命乐官伶伦到西方山中去采集竹子，作为十二律的律管。古希腊神话中有个传说：人身羊脚、头上长角的牧神潘（Pan）爱上了美丽的山林女神叙林克斯（Syrinx），潘向女神求爱遭到拒绝，于是他把女神变成了芦苇。当潘神走到芦苇丛中拔取苇杆，用嘴吹奏音乐时，女神便承受了"爱的呼吸"。所以现在的簧片乐器与芦苇的英文词是同一个字-Reed，排箫的英文写法是Pan-Pipe。著名的作曲家拉威尔（Ravel，1875-1937）在芭蕾音乐《达弗尼斯与克洛娅》（Daphnis etd Chloe）中就描述了这个故事。

我国古代曾把音乐中的六律六吕与一年的十二个月份联系在一起。如黄钟、大吕、太簇、夹钟、姑洗、仲吕、蕤宾、林钟、夷则、南吕、无射、应钟依次对应从11月到次年10月的月份。中世纪的英国著名科学家牛顿（Newton，1643-1727）曾把音乐与颜色对应起来，以赤、橙、黄、绿、蓝、青、紫对应于C、D、^{b}E、F、G、A、^{b}B七个音等等。

1.1.2　国外声学发展的历史

国外声学发展的历史源远流长。相传古希腊的毕达哥拉斯（Pythagoras，约B.C.584-

B. C. 497）经过铁匠铺时，注意到铁锤落到铁砧上发出的音与锤的重量有关。当铁锤的重量比依次为1：3/4：2/3：1/2时，发出第一、四、五、八音程的声音。其后，他又用弦线进行了试验。亚里斯多德（Aristotle，B. C. 384-B. C. 322）也曾提出空气的运动构成声音的构想。图1-1展示了古希腊的音乐活动，音乐之父巴拉和毕达拉斯，及其学生菲洛莱一起研究各种钏、锤、弦和笛管乐器的声音。



图1-1 古希腊传统中的音乐活动

伽利略（Galileo，1564-1642）认为音的高低取决于弦线在每秒钟内振动的次数。1636年，默森（Mersenne，1588-1648）提出了弦线振动除基音以外还有泛音，并用听到火枪的声音与看到闪光之间的时间间隔测定了声速。后来，许多人都测量了声速。牛顿从理论上推导了声速公式，$u=\sqrt{\frac{P}{d}}$其中P是大气压强，d是空气密度，并测出u=1142呎/秒。索维尔（Sauveur，1653-1716）正确地解释了"拍"的现象，并用以测出了管风琴的发声频率。

自十九世纪开始，声学正式成为物理学的一个分支。克拉尼（Chladni，1756-1827）被称为"声学之父"，他用实验方法研究了弦、竿、板的振动，观察到了"克拉尼图"（图1-2）。他

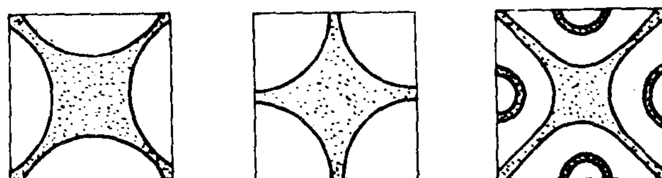


图1-2 中间点固定的正方形平板，用弓在边缘不同部位激发振动而得的"克拉尼图"。

发现了弦和竿的纵向振动和扭转振动，并测定了固体及其它介质中的声速。1866 年，孔特（Kundt，1839-1894）用驻波的方法精确测定了声速。测定在各种介质中的声速一直是许多物理学家的实验工作。

亥姆霍兹（Helmholtz，1821-1894）开创了声学历史上的新纪元。他在 1863 年出版的《声音的感觉的理论》(Die Lehre von den Tonempfindungen) 一书中提出的和声理论，至今仍是声学的基础。他指出：乐音是由空气的周期振动引起的；乐音可以以音强、音调和音质来区分；几乎所有的乐音都有“上分音”即泛音，泛音时的个数及其相对强度决定音质。他设计了球状的谐振器用以分析人的声音和乐音。他还用电磁方法人工产生元音，模仿风琴管的音色。他用“拍”的理论解释了两音合成后听觉上的快感与频率之间的关系等等。

在西方，声学的应用也不断发展。汽笛在十七世纪就被发明了。1871 年爱迪生（Edison，1847-1931）发明了留声机。二十世纪初赛宾（Sabine，1868-1919）对礼堂声学的研究作出了杰出的贡献，奠定了室内声学的基础。

1.1.3 我国声学发展的历史

在我国古代，声学一直是被视为一个重要的科学和技术门类。在殷墟的甲骨文中就有“磬”字，写作“[illegible]”，即一个人举锤击石。以后，历代对于发声的道理、声的传播、声学的应用特别是乐器声学等方面的研究，都有杰出的建树。

东汉王充在《论衡》中写道：“生人所以言语吁呼者，气括口喉之中，动摇其舌，张歙其口，故能成言。譬犹吹箫笙，箫笙折破，气越不括，手无所弄，则不成音。夫箫笙之管，犹人之口喉也；手弄其孔，犹人之动舌也。”这解释了当人的嘴巴张合和舌头运动时才能发声，并且还必须有个管腔。又说道：“人坐楼台之上，察地之蝼蚁，尚不见其体，安能闻其声。何则？蝼蚁之体细、不若人形大，声音孔气不能达也。”这里讲了声音要靠空气来传递。他还用水波的传播来比喻声波。

明代宋应星《论气》中的《气声》篇写道：“气本浑沦之物，分寸之间，亦具生声之理。……冲之有声焉，飞矢是也；界之有声焉，跃鞭是也；振之有声焉，弹弦是也；辟之有声焉，裂缯是也；合之有声焉，合掌是也。”说明是物体冲击空气而发声：“气得势而声生焉”。

春秋末年的著作《考工记》中已指出：“凫氏为钟，……薄厚之所震动，清浊之所由出。”同时代，有乐工指出：“凡乐器，厚则声清（高），薄则声浊（低）。”。“磬人为磬，让（发声高）则磨其旁，已下则磨其端”。《韩子》中记载：“瑟者，小弦大声、大弦小声。”东汉《论衡》上写道：“天且雨，……琴弦缓。”这些都论述了钟、磬的厚薄，弦的长短以及气候条件等与发声高低之间的关系。

关于物体发声的强弱、传播距离和音质的关系，历史上也有记载。《考工记》所载：“钟大而短，则其声疾而短闻；钟小而长，则其声舒而远闻。”又有“鼓大而短，则其声疾而短闻；鼓小而长，则其声舒而远闻。”等，都说明了振动物体的大小、发出能量的多少与传播远近的关系。《礼记 · 乐记》中已有“钟声铿……，石声磬……，鼓鼙之声讙……。”这是对音色的最早记载。《考工记》中也有“钟已厚则石，已薄则播，”即厚则太闷，太厚则散。另外关于共振、共鸣的原理和应用也有记载，而且做出了世界上最早的共振实验。

声学的应用在我国古代也早记载。《墨子》上记有，在对付攻城的敌人时，“穿井城内，五步一井，传城足……令陶者为罂，……置井中，使聪耳者伏罂听之，审知穴之所在，凿穴迎

之。"《梦溪笔谈》中也讲到"虚能纳声"，使士兵在行军宿营时以箭壶作枕，可能听到几里以外人马的踏地声。在建筑声学方面，我国古代也有较大成就。

我国古代在音乐声学方面最突出的贡献之一是音律学，特别是明代朱载堉(1536-1614)在世界上首先系统地提出十二平均律，关于这一点我们在以后还要专门讲述。

我国音乐声学方面的另一突出成就是乐器制造。我这里只举一个杰出的例子，即曾侯乙编钟。1978 年，在湖北随县出土的春秋战国时期的曾侯乙编种（图 1-3)，经测定距今已有二千四百多年（B.C. 433 年)。其音域的宽广，律制的完善，音准的精确，以至于工艺的精巧，都是当时世界上无可比拟的。曾侯乙编钟的特点，极其概括的说起来有以下几个方面。

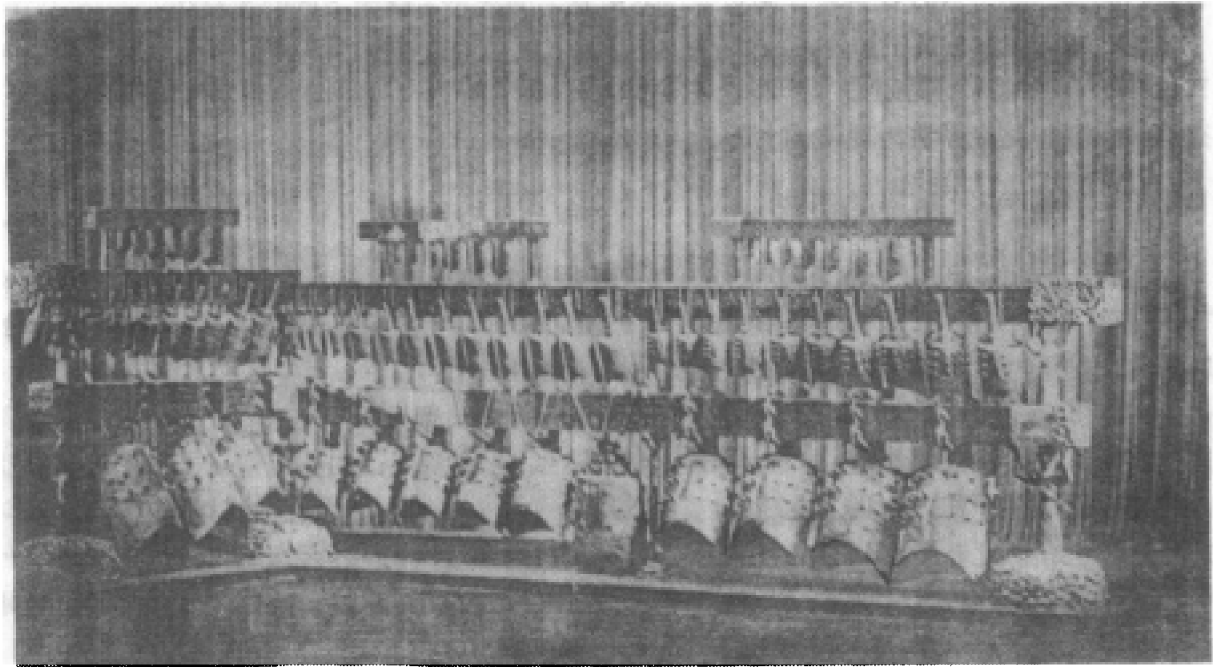


图 1-3 曾侯乙编钟

1）编钟数目多，音域广。编钟共有 65 枚，分三层，有五个八度的音域。其中间的三个八度有三套，即五声、六声、七声音阶，各十二个调。

2）用十二平均律，兼用五度、三度关系。

3）用六个调记录，即姑洗（C)、妥蕤宾（D)、鬲音（E)、无射（F)、黄钟（^{b}A)、大族（b_B)，括弧里是相当的现代音名。

4）有标准音高，以 b_A 为标准音高。

5）频率计量已相当准确，与一年的天数对应，以 $^{\#}$F＝365.4Hz 为中间音。

6）音高关系准确。下面列出几个钟的现时的物理音高的准确值与测量值的对比，可见相差无几。

钟号	#53	#54	#64	#63	#62
相当于当代音名	C	D	E	G	A
相应的物理音高理论值（取整）(Hz)	64	72	81	96	108
实测的音高	64.8	72.6	80.1	98.4	103.2

7）标出了当时各国律制间音高的对应关系。如曾国的姑洗相当于楚国的吕钟，曾国的大族相当于楚国的穆钟、晋国的槃钟、周的剌音等。

8）钟的形状是扁钟（椭圆钟），有两个基频。

宋代沈括 在《梦溪笔谈》中指出："古乐钟皆扁，如盒瓦。盖钟圆则声长，扁则声短。声短则节，声长则曲。节短处声皆瓦，不成音节。"指出了圆钟和扁钟的优缺点。在编队演奏中，圆钟是不好的，因为延时太长了，许多音混在一起，不成音律。在国外，钟是圆的，所以一直到十九世纪，对钟是否可以制成单独演奏乐曲的乐器还抱怀疑态度。而我国春秋时的钟就已经解决了这了问题。

因此，无怪美国的著名学者麦克伦（E. G. Mclian）在《曾侯乙青铜编钟一巴比伦的生物物理学在古中国》一文中写道："曾侯钟及其排列方法、命名系统和调律都显示出'结构上的成熟'。复杂的律制、高超的工艺都超过了我们迄今对古代音乐世界的一切猜想。不仅其制作技术水平，而且在哲学一音乐学上所获得的成就，都使我们高度钦佩。同时处在公元前五世纪的古希腊却没有给我们留下任何堪与之比较的具有音乐价值的工艺品，虽然我们一向习惯于崇拜古希腊"。

1.1.4 声学的发展离不开音乐

从以上所述的声学发展历史来看，无论是中国还是外国，都是与音乐紧密地联系在一起的。

据我国最早的物理学史专家吴南薰先生考证，世界上第一个人工制作的物理仪器就是在兽骨或竹管上挖个孔，吹出声来的笛子。这既是一种乐器，也是一种声学仪器。

我国物理学史上最重要的精确定量的理论工作就是音律的计算。朱载的平均律算到 25 位数。这也是我国自然科学史上与天文学计算并列的两种精确的定量计算之一。可以说，音律学是音乐与数学的结合。我国声学发展中最显赫的成果曾侯乙编钟，也属于音乐声学研究的范围。

声学是研究声的发生、传播、接收、声的性质以及声与其他物质的相互作用之关系的。从声学研究的这几个方面来看，不论国内外，发声常常是以弦和管的发声来讨论的。声的传播也以钟声、细弦的传声远近来研究。声音的性质，如发声的高低、强弱、音色、泛音等，也都是从乐器发声开始的。共振、驻波等实验也常常用的是琴弦、琴室等等。可以说，声学的发展离不开音乐。外国声学发展史上最杰出的两位科学家即克拉尼和亥姆霍兹研究的也都是乐器的发声模式和乐音的理论。历史上的标准音高，也是物理学家和音乐家共同制定的。古今中外，许多物理学家或数学家也同时是音乐家。有的国家，既聚汇集了许多杰出的物理学家，又是许多著名音乐家生长的摇篮。比如德国，有开普勒（Kepler，1571-1630）、夫琅和费（Fraunhofer，1787-1826）、韦伯（Weber，1804-1891）、欧姆（Ohm，1787-1854）、基尔霍夫（Kirchhoff，1824-1887）、赫兹（Hertz，1857-1894）、伦琴（Rontgen，1845-1923）、盖革（Geiger，1882-1947）、亥姆霍兹、普朗克（Planck，1858-1947）、爱因斯坦（Einstein，1879-1955）、穆斯堡尔（M össbauer，1929-）、等物理学家，又有亨德尔（Handel，1685-1759）、巴赫（Bach，1685-1750）、韦伯（Weber，1786-1825）、贝多芬（Beethoven，1770-1827）、门德尔松

* E·G·Mclian，原载 Journal of Science Biologic Structure，1985·8，黄翔鹏译，见《中国音乐学》1986 年。

(Mendelssohn，1809-1847)、舒曼（Shumann，1810-1856)、瓦格纳（Wagner，1813-1883)、勃拉姆斯（Brahms，1833-1897）等音乐家。我国的朱载堉既是音乐家又是数学家和天文学家，而当今及以后音乐声学的发展，也还需要音乐家和物理学家的共同努力。

§1.2 现代音乐声学（Modern Musical Acoustics）的性质和特点

1.2.1 科学与艺术的结合

科学与艺术的关系是一古老的课题。已经有众多前人先哲，包括科学家、艺术家和哲学家、思想家，对此发表过他们的真知灼见。有人强调它们的区别认为，作为人类文化的两翼，“科学探索大自然，而艺术则探索人的心灵。”（俄国诗人穆斯泰·伽，里姆)。“科学著作的生命很短，而艺术可以让我们永葆青春。”（俄国物理学家契达依戈罗茨基)。有人则指出：“艺术家的猜想与科学家的发现多么相似”（法国文学评论家巴尔扎克)；“真正的科学和真正的音乐需要同样的思维过程。”（美籍德国物理学家爱因斯坦)。一直到现在，许多人还在争论：未来属于科学，还是属于艺术。

人类活动一开始，科学和艺术就是结合的，希腊神话中太阳神阿波罗既是司医学、航海之神，又是司音乐、文艺之神。毕达哥拉斯也讲述道：“简单的音乐比例与自然符合一致是最好的艺术”。许多哲学家认为，科学的和谐与艺术的和谐都是最美的体现。如前所述，在声学的发展过程中，音乐与数学和物理从来就是密切相联系的，因此，音乐声学是一门科学与艺术结合的科学。这是现代音乐声学的第一特点。

与其它自然科学一样，到了中世纪以后，科学和艺术分离脱节，各自向着自己学科细分、深入的方向发展，它们之间形成了一道不可逾越的鸿沟。声学与音乐在一定程度上也是这样。这本身地合乎客观规律的，是人类文明发展中的自然进程。随着科学的发展，科学与艺术越来越相互渗透。正如十九世纪法国的文学家福楼拜（Flaubert，1821-1880）所说的：“艺术越来越科学化，科学越来越艺术化，两者在山麓分手，有朝一日，将在山顶重逢。”当前，音乐声学这门学科也应该在更高的层上，以更新的涵义和内容，以更广阔的视野和观点来展现自己，在“山顶重逢”了。

1.2.2 当前科学、文化发展的前沿

当前科学技术和文化的发展有两个特点。第一是，各种门类学科的交叉和渗透到达了一个新的阶段。如果说本世纪初到二、三十年代出现了第一类交叉学科，即几门自然科学之间的交叉，如生物物理，地球化学等，本世纪的四、五十年代出现了自然科学与社会科学之间的渗透，如数学、数理统计之用于经济理论和社会学，放射性同位素之用于考古学等，这是第二类交叉学科。而进入六、七十年后代以后，则是自然科学、技术科学、社会科学、人文科学、艺术和哲学等多种门类学科的交叉和融合，无数交叉性的新学科如雨后春笋般地出现。有的学科已经说不清楚是属于哪个门类了。例如计算机广泛应用于多种科学和艺术，工业设计学集技术设计、造型艺术、技术美学、人体工程学、消费心理学于一体等等。当前科学技术和文化发展的特点第二是，主体与客体的统一，而这种统一是以人为中心的。本来，不论是科学，技术以至全部人类的文化艺术都是人类所创造，又是为人类服务，为人类所享用的。

随着人类物质生活水平的迅速提高，有了人类文明的不断进步，人类已经有更多的时间和能力，在满足物质生活水平不断提高的同时，去接受更好的教育，从事更多精神文明的创造，并获得更高的艺术享受。人们越来越看到自身的价值。“人是世界上最复杂的真理的结晶”（马克思）。例如，前面举的工业设计学就是人与产品、人与环境关系的统一，把人的消费心理、审美活动和生活情趣等联系在一起，并突出以人为中心。

现代音乐声学正是处在上述当前科学文化发展的这两个特点的交汇点上。它既是物理学、电子学、音乐艺术、心理学、生理学、美学、计算机科学等多种不同门类学科的汇合，又通过听觉把主观和客观沟通起来，其目的在于为人类创造更美、更好的音乐环境。这是音乐声学的第二个特点。另外，还要指出的是，某些高科技的发展，如人工智能的发展，音乐声学也很可能是一个有希望的前沿阵地。

1.2.3 广泛的生活基础和群众基础

古往今来，无论是哪个国家，哪个民族，都离不开音乐，原始人庆祝狩猎胜利要载歌载舞；皇帝祭天拜祖有礼乐；西方人结婚要进教堂，唱赞美诗；中国人办喜事要吹吹打打；外国人死了有葬礼曲，安魂曲；中国人要做道场念经唱经；行军打仗更离不开音乐，刘邦用“四面楚歌”围项羽于垓下，拿破仑用《马赛曲》在普法战争中鼓励士兵越过阿尔卑斯山……在现代，随着电声技术的发展和普及，音乐的用途也越来越广泛。音乐可以促进植物生长，使母鸡下蛋；可以驱鸟，除虫，治病，进行胎教；在工作环境中播放音乐可以提高劳动生产率；在学习环境中播放音乐作为背景，可以调节大脑功能，促进思维，减少疲劳，等等。

由于收音机、电视机、录音机、组合音响等已经进入大多数家庭，人们生活中接触音乐的时间、空间已经大大超过过去任何时代。音乐素养已经成为现代人文化水平的一个重要标志。人们有要求、有能力（包括经济能力）、有条件去更多地学习音乐。传统乐器以及电子琴等已普遍地进入普通百姓的家庭。人们除了希望更多地了解和掌握音乐和乐器的有关知识外，还想掌握和使用现代化的家用音乐电声设备，直至使用电子乐器、合成器或计算机，用好卡拉OK系统，以及了解电子音乐的欣赏知识和音乐声学的知识等等。这样，音乐声学就有了更广泛的群众基础、生活基础和物质基础，这是现代音乐声学在当前的第三个特点。

1.2.4 发展中的新学科所面临的新课题

随着以上所述的音乐声学特点而来的是它的第四个特点，即现代的、新的音乐声学是一门发展中的新科学，它面临着许许多多的新问题。诸如：

音乐声的含义到底是什么？它与传统的乐音有何区别？音乐声的范围与可闻声是否相同？是更窄一些？还是更宽一些？

如何描述人对音乐声的主观听觉感受？能不能有科学而又规范的概念？这些概念的含义又如何阐述？这些主观感受表述概念的客观基础又是什么？看来，音乐声的主观评价应该发展成为一个专门研究的课题和学科，包括它的应用方面和理论方面。

作为乐器，如何更加科学地分类？作为乐器标准或音律研究等，又如何根据主观感觉的灵敏程度来科学地予以制定或确定其界限？

一些传统的音乐问题，如和声的谐和、和弦的协和性等，如何作更加科学的解释和进一步的研究。

作为传播音乐声的工具，如何做得更加保真？什么是高保真？保真度越高是否一定越好？怎样对音乐声进行加工？除了电声的方法还有些其它什么方法？除了已有的加工内容以外，还可以有哪些加工内容？

音乐声有几个要素？是不是还是传统的乐音三要素？其性质如何作更深入的研究？比如，音色到底决定于什么？各个要素的主观量与客观量之间为什么有这样的差别？

计算机如何渗透到音乐之中？现代音乐声学的体系到底应该如何建立？怎样应用现代科学和艺术具有的一些共同规律来研究现代音乐声学等等。

1.2.5 简短的结语

综上所述，可以归结为：

现代音乐声学（Modern Musical Acoustics）是一门多门类学科相互交叉、渗透，客观与主观密切结合的学科。是一门体现了当前科学、文化发展的特点，正处在发展前沿的科学。

由于音乐越来越广泛地进入每个人的生活，出于文化素质、欣赏水平提高的要求，人们对学习音乐声学的知识也提出了迫切的要求。所以，现代音乐声学是一门有广泛生活基础和群众基础的学科。

现代音乐声学有许多新的、实际的和理论的课题需要去研究解决。这样，就能够得到应用发展部门的支持。

现代音乐声学需要用新的观点和方法去研究。现代音乐声学是一门生机勃勃、充满活力的、有广阔发展前途的学科。

§1.3 现代音乐声学的研究对象、研究内容和相邻学科

1.3.1 现代音乐声学的研究对象一音乐声（Sound of Music）

既然声学是一门研究声的发生、传播、接收、声的性质以及与其他物质相互作用的科学，那么，音乐声学就是一门专门研究音乐声的发生、传播、接收，音乐声的性质以及与其它物质相互作用的科学。

于是，首先遇到的一问题是，我们要把“音乐声”这个范畴予以明确的定义。在传统的声学中，声音分为乐音和噪声。乐音的振动是有一定周期性的，它表现出一定的音高，或者说它的频谱是分列的；而噪声的振动是一些杂乱的、无周期性的振动，没有明确的音高感觉，在频谱上是连续的。但在现实的音乐世界里，音乐声的范围已经远远超出了乐音。当然，过去也早已经是这样。如锣、鼓、沙锤的发声，滑音的演唱、演奏，甚至约翰·斯特劳斯（John Strass，1825-1899）的乐曲如《匪徒》加洛普里也出现过枪声等。然而，在现代音乐中，如先锋派的音乐在演奏中纳入了许多器物的碰击、摩擦声。在录音保真技术中讲究录入歌唱者的呼吸、气息声，演奏者的手指击键声等。特别是电子合成器被广泛使用以后，原则上可以制造出任何声音或音响效果，还有专门的“鼓机”，“效果发生器”等。实际上也是如此，利用合成器制成的千奇百怪的声响，已经进入电影、声像、广告、剧场等各种场合。有连续的，有断续的；有轻柔的，有怪诞的；有的模仿自然界的风声，涛声；有的则什么也不是；有的叫出了名堂，如“宇宙声”，更多的是随心所欲的，等等。其中非传统意义上的乐音占了越来越

大的比重。这样，也就区别于传统上的“乐音”。除此之外，过去认为音乐声只限于人耳可闻的、从 20Hz～20kHz 的频率范围内，现在已经证明，超过 20kHz 的超声在谐波中的存在也会显著地影响音色。因此，音乐声也包括了部分超声。**因此，我们把音乐声定义为，除乐音外，包括一部分音乐中出现的噪声以及在谐波中出现的对音色有影响超声在内的，在音乐生活的各个领域或过程中出现的所有声音。**根据上述可见，音乐声学除了研究所有乐音以外，也要研究在音乐声范围内的噪声和超声。同时，为了抑制不需要的噪声，某些噪声包括其发生、性质及控制，也在音乐声学的研究范围之内。

1.3.2 现代音乐声学的内容

根据音乐声学的研究对象即音乐声的发生、传播、接收、它的性质以及与其他物质相互作用，音乐声学应有以下内容：

音乐声的发生。主要包括人声、传统乐器发声和电子乐器的电振荡发声。计算机音乐也是电发声。当然，音乐在有时也有些背景声、效果声、装饰声或特殊要求的声响，是录制的自然声，例如鸟叫声、流水声、海浪声、火车声（有时我们也把它放人“自然声”）等，这些我们就不把它放在音乐声发生的讨论范围之内了。

音律理论研究的是系列音的产生方法及其相互间的关系，它属于音乐声学的一个理论部分。

音乐声的传播主要包括在空气中及一些材料中的传播。其中有声音的独立传播性质，有在各种场所如剧院、音乐厅、礼堂、居家、广场、庭院、录音棚、试听室甚至闹市人群等处的音乐声的传播。有在传播过程中的加工、控制，降噪、人工延时、人工混响、均衡及各种人工效果等，还包括各种材料、物体的反射和吸收声的性质。纯属技术性的电声信号处理、传播、发射等将在别的学科中去专门研究，不包括在音乐声学的范围之内。

音乐声的接收包括在各种场合、用各种拾音器的接收以及人耳的接收。人耳的听觉与心理过程是分不开的。关于音乐声的主观评价、其主观感受的客观依据及一些乐器或在某些条件下的听觉特点等，都是应该研究的。至于人耳接收、听觉传递的纯生理机制则不包括在音乐声学的研究对象之内。

音乐声的性质包括其强弱、高低和音色、时态等，包括其本身的性质以及在传播中与其他物质相互作用中的性质。还有评价声音质量标准和方法，它可以有客观标准，也有主观感受。

音乐声与其他物质的相互作用包括乐器中的耦合发声或共鸣机制，音乐声传播中的干扰、消音或控音机制等。

由此可见，音乐声学的内容是综合性很强的，是物理与音乐、主观与客观密切结合的。

综上所述，本书把音律学、乐器声学、歌唱声学、音乐电声学、室内音乐声、音乐声的主观评价和计算机音乐作为现代音乐声学的主要内容予以介绍。由于声谱至今为止还是一种重要的研究音乐声的手段，亦予单列一章介绍。

1.3.3 现代音乐声学的基础学科

音乐声学的基础学科（或称作“母学科”）有：

物理学是音乐声学的最主要的母学科。音乐声学本来是声学的一个分支，音乐声是声波的一种，因此，振动和波的理论，谐 波分析，声学测量等是用得较多的。电子学技术，物理

仪器也遍及音乐声学的各个方面。物理实验方法也被用于音乐声听觉的研究。

数学除了在有关的物理中，包括数学物理方法中的应用以外，代数中的对数、数列、行列式，级数，还有数理统计、信号处理的数学方法及傅氏分析等也是常用的。

音乐学及音乐表演艺术当然也是音乐声学主要的母学科之一。此外，还有生理学中的听觉机理，人的发声机制等以及心理学的基本理论、观察方法、采样方法等。

计算机越来越广泛地应用在一切科学、生产部门以及家庭中，音乐声学也不例外。因此，计算机科学也是音乐声学的一门基础学科。

美学就是审美学，其研究的对象是审美活动的各个方面。美学中的各种问题，如什么是美？美的形态，美的追求，美的标准，美的时代性，美的民族内容，美的设计，美的客体与主体等，都会在音乐美中出现，都是与音乐声学有关的课题。

由上所述，我们在本书中特别把物理中的声学，生理学中的听觉以及音乐基础作单列一章介绍。至于有关的数学、心理学、实验方法以及美学、计算机的应用等就不单列去讲，而把它们纳入有关的章节中。

1.3.4　现代音乐声学的相邻学科

音乐声学的相邻学科是很广泛的，大体包括以下几类：一类是上述一些基础学科；一类是声学中的相邻分支如语言声学、建筑声学、噪声控制、声学测量等；一类是与音乐有关的相邻学科，如音乐学、音乐史、音乐表演艺术、音乐心理学、音乐美学等；一类是工艺性、技术性较强的学科，如乐器制造、材料工艺、录音技术、计算机音乐制作等。下面我们就用图表的形式把音乐声学与相邻学科的关系粗略地表示出来（见图 1-4）。这仅仅是一个大体的概况，随着这门学科的发展和逐步成熟，必然还会有所调整或增加。

§1.4　现代音乐声学的研究方法和现状

现代音乐声学的研究方法应该包括其各个母学科的研究方法和针对现代音乐声学这门新学科特点的新的研究方法。

1.4.1　沿用母学科的研究方法

传统的物理学方法是研究音乐声学的重要方法，包括声谱方法和其它方法如客观激励，激光全息，力—声—电模拟方法等。物理声学仪器也是测量音乐声的基本仪器。

心理学实验方法和试验方法，表演艺术的评价方法，美学的研究方法及计算机的采样方法等都可以用到音乐声学的研究中来。

从方法论角度看，传统的研究方法中包括理论方法和实验方法、归纳方法和演绎推理方法、客观方法和主观方法等，都可以予以沿用和发展。当前要强调的是理论方法、演绎方法和主观方法。

各个基础学科的研究方法也可以相互交叉、渗透，综合使用。这也可以算是一种新学科的研究方法。例如，把物理实验方法和实验思想用到音乐声的研究上来，把计算机处理、分析数据的方法用到检验听觉的测听试验上来，把定量的统计检验方法用到研究心理因素对测听影响上来等等。

音乐声学的内容及其与相邻的科学、技术、艺术等学科的关系。

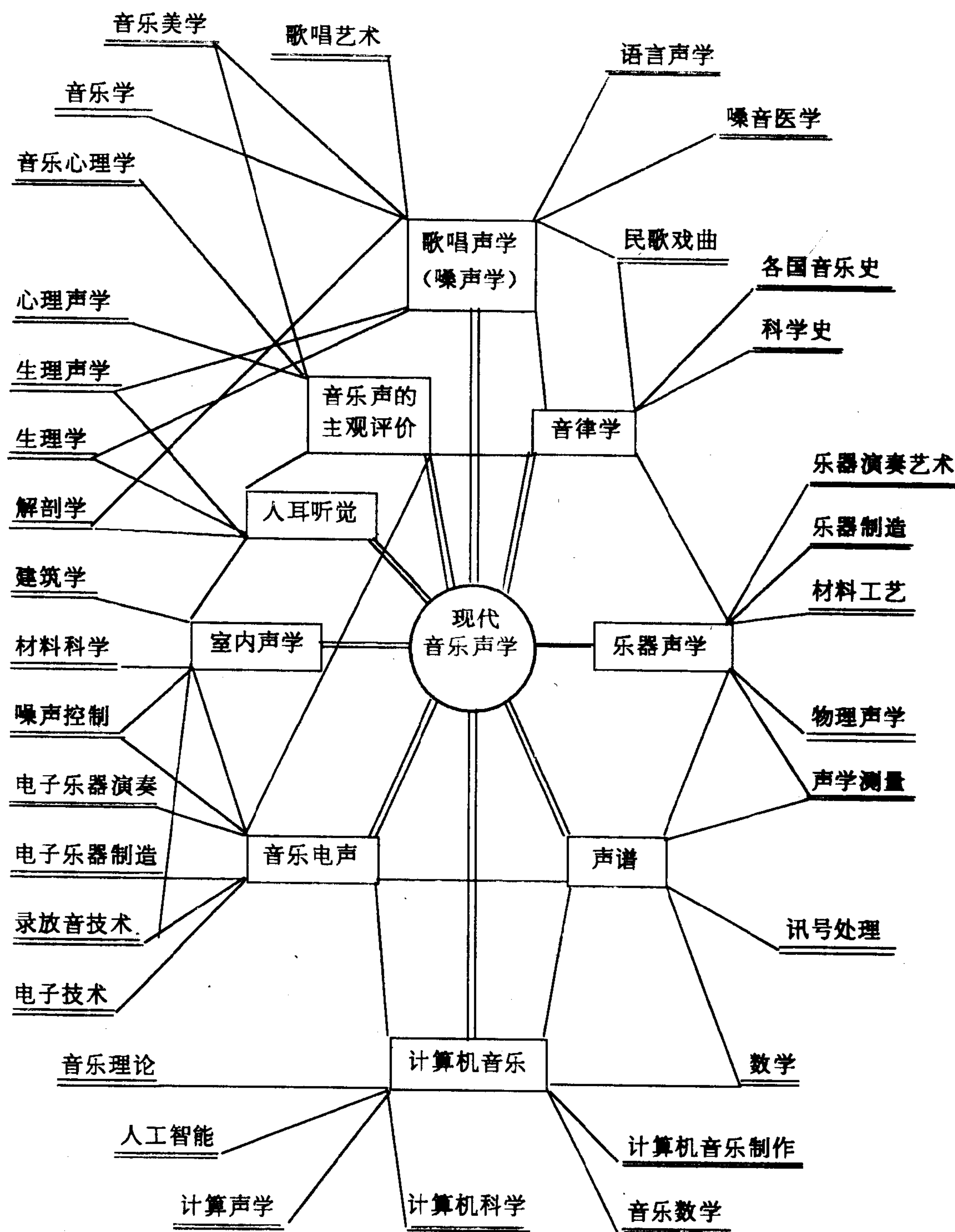


图1-4　音乐声学的内容及其与相邻的科学、技术、艺术等学科的关系

1.4.2 当今各种门类科学、艺术的共同规律

当前各种门类的科学，包括自然科学、技术科学、社会科学、信科学以及各种形式的艺术等，有许多共同规律，大体上有以下几种：

1）要素构成规律

各种学科，在各个层次上都由几个要素构成，如运动学中的时间、位置、速度、加速度等，造型艺术中的平面构成、立体构成、色彩构成、质地构成以及综合构成等，发明学中的发明对象、发明成果、发明环境、发明主体、主体的创造性思维、发明思想、发明方法、发明技法等。

2）形式规律

形式规律包括对称、节律、统一、对比、均衡、比例、变化、主从、运动、装饰、符号、规律等。比如，天体运动有节律，音乐有节奏，经济生活也有节律。又如，构图要均衡、物体的结构要均衡、人的心理也要达到均衡等。当然，对称。统一、均衡也是相对的。

3）量的规律

自然科学是定量的，这已经没有问题了。经济学和艺术现在也都朝着定量的方向发展，如计算国力指数，经济学中的“熵”增加或减少，艺术评估中的定量化，产品评价中的权重，量化的美学等。

4）创造规律

世界上迄今为止所有的精神和物质产品都是人类所创造的。当然，作为人类文明和智慧结晶的科学和艺术也不例外。全部人类的历史就是一部发明创造史。因此，创造规律必然是一切科学、艺术的共同规律。创造性思维的形式包括逻辑思维、形象思维、联想思维、灵感思维等，不管是对科学还是对艺术都是适用的。创造性思维的方法，如归纳、总结、抽象、演绎、多元化的思维、信息反馈等都是普遍的。形式方法、结构方法、移植方法、模拟方法等创造方法也是普遍适用的。

5）学科思想规律

各门学科都有其学科的指导思想。如物理思想，实验思想，发明思想，文学创作思想，设计思想等等。

6）美的规律

人间万物都是美的，有自然美、艺术美、形象美、科学美、技术美等。各门学科有其特殊的美，如物理学以其理论结构的严谨、立论的新奇、推理的准确和数学上的和谐以及对其他学科的渗透能力见美。经济学的美在于其理论的翔实、能驾驭社会经济，把发展和富裕带给人民等等。

1.4.3 开辟研究现代音乐声学的新方法

现代音乐声学要采用的新研究方法的另一方面就是自觉地利用上述这些科学和艺术的共同规律和方法来提炼出音乐声学新的思想，构成新的体系。

例如，利用要素构成规律把音乐声归结成音高、响度、音色和时值（音长）四个要素。以其各自之间的关系去说明问题。如音高本身构成音程、和弦、音律，音高与时值就构成了旋律、曲式、和弦进行，响度和时值构成节奏和动态曲线，频率（音高）和声强（响度）构成

频谱。又根据创造规律中的形式方法、预测音色与强度和音高之间存在关系等等，再去进行研究。

又例如，根据量的规律，对音乐声的主观评价如何进行量化等。

再例如，在音乐声的主观评价方面如何排除主观心理不稳定因素的影响？如何开辟用计算机研究音乐的新途径等等。

当然，以上这些只是一些推测和猜想，还需要探索、实践。从当前来说，这只是一些辅助和补充的方法。

1.4.4 音乐声学的国内外现状

由于音乐声学是一门古老的学科，长期以来，国外对于传统乐器的研究已做了大量的工作，在许多大学的物理系以及音乐院校都开设了音乐声学课程，基本上是音乐物理学。

自从电声乐器和电子音响问世并普及以来，国外投入大量的人力、物力在这方面的研究、开发上，主要集中在产业部门，围绕电声的研究进行，进展极其迅速，许多高校开设了专门的有关音乐电声的课程。

计算机音乐和对合成器系统的开发、研究和使用也是国外最近一、二十年来的热门课题。基本形式是：音乐家使用合成器和计算机，电子技术音响专家则从事技术工作，物理学家和数学家也有介入。计算机音乐和合成器系统已经进入普通知识分子中音乐爱好者的家庭。

我国这几年来也开始更多地投入音乐电声和计算机音乐的研究。机电部第三研究所是研究电声的主要基地之一，也从事技术开发工作。上海交通大学和上海音乐学院于 1984 年建立了我国第一个计算机音乐研究室。中国音乐学院、中央音乐学院、中国音乐家协会以及其它一些单位也建立了相应的计算机音乐实验室。北京大学于 1987 年成立了音乐声学与计算机音乐研究室，与机电部第三研究所、中国科学院声学所等单位合作，当前主要从事用物理实验方法对音乐声学进行基础理论研究工作和实验工作，也从事一些计算机音乐的开发工作，在国内理工科大学里第一次讲授“音乐声学概论”这门课程。国内的有关单位也曾多次邀请国外的知名学者来华交流讲学，如 T. D. Rossing（美）等都到过北京大学音乐声学实验室。MIDI（Musical Instrument Digital Interface）系统在国内也正在迅速普及。总的来说，我国的现代音乐声学还刚刚在起步。作为一门新学科，正如上面所述，无论是国内还是国外，都是开创性的、试验性的。

特别要指出的是，1991 年 3 月，在北京现代物理研究中心主任、著名物理学家、诺贝尔物理奖获得者李政道教授的倡议下，在北京大学召开了“全国首届音乐物理与音乐心理研讨会”会后成立了“全国音乐物理、音乐心理学术联络组，挂靠在北京大学现代物理研究中心、文化部艺术研究院及音乐研究所以及北京天琴电脑声光像公司等单位，这标志现代音乐声学作为一门新的学科在国内得到了承认及有了新的起点。1992 年召开了第二次音乐物理、音乐心理会议，1994 年 10 月召开了中日双边音乐声学国际研讨会。

思考题：

1. 请列举出一些生活中与音乐声学有关的事物。
2. 欣赏一场在音乐厅或剧院举行的由管弦乐队演奏的音乐会或一场歌剧、舞剧、地方戏

曲，或观看一段带有音乐的电视、录像节目。然后，列举出其中与音乐声学有关的事物。

3. 你认为现代音乐声学这门学科有哪些特点？其发展前景如何？

4. 你对音乐声学的内容、构成、研究方法等有什么建议和意见？

参考资料：

1. F. 卡约里：《物理学史》，戴念祖译，内蒙古人民出版社，1981 版。

2. 申先甲、张锡鑫、祁有龙：《物理学史简编》，山东人民出版社，1983 版。

3. 廖辅叔：《中国古代音乐简史》，人民音乐出版社，1985 年版。

4. 吴南薰：《物理学史稿》，北京大学物理系图书馆。

5. 龚镇雄：“科学、和艺术的共同规律与现代音乐声学”。
CCAST－WL，Workshop series：Vd. 30 1993

6. 吴钊、刘东升：《中国音乐史略》，人民音乐出版社，1985 年版。

7. 贝京：《艺术与科学》，任光宣译，文化艺术出版社，1987 年版。

8. 龚镇雄：“音乐·科学·宇宙”，科技日报　1994. 7. 24，7. 31，8. 7；《科学画报》1994，11 期。

第二章 音乐声学的物理基础——振动和声波

§2.1 振 动

2.1.1 振动，周期振动，简谐振动，简谐振动的三要素

1）振动（Vibration）

物体在一个位置附近作往返运动叫做振动。比如你摇摇手、晃晃头，公共汽车来回行驶，一个球在碗底来回滚动，用两只脚走路，拍皮球，打乒乓球，张嘴说话等等，都是振动。

推广一步，一个物理量环绕某一个参考系（参考量或参考标志）作往返运动，也叫做振动。比如电线中交流电的电子往返运动，电磁波中的电磁场作往返振动，一年四季温度的起伏，声波在两个平面之间来回传递，激光光束在谐振腔的两个反射面之间来回反射等等，也都是振动。

2）周期振动（Cycle Vibration）

如果每经过一定时间，物体的振动或物理量的振动与起始时充分一样，那么这种振动就叫做周期振动。比如，织布机工作时梭子的运动，把一块长方形或三角形的木块按入水里后再松手，木块作上下浮沉运动，健康人熟睡时均匀的呼吸，地球绕太阳运行等。

所谓充分一样，是指运动物体的位置、方向、速率、速度的变化率等或物理量的大小、变化等都一样。所说的每过一定的时间，这一定的时间就叫做周期。

3）简谐振动（Harmonic Vibration）

有一种周期振动，它的位置或物理量 X 随时间 t 的变化遵从正弦（或余弦）规律，这种周期振动就叫做简谐运动。用数学式表示，为

$$x = A\sin(\omega t + \psi_0) \qquad (2.1)$$

或

$$x = A\cos(\omega t + \psi'_0) \qquad (2.2)^*$$

用图形表示如图 2-1 所示。

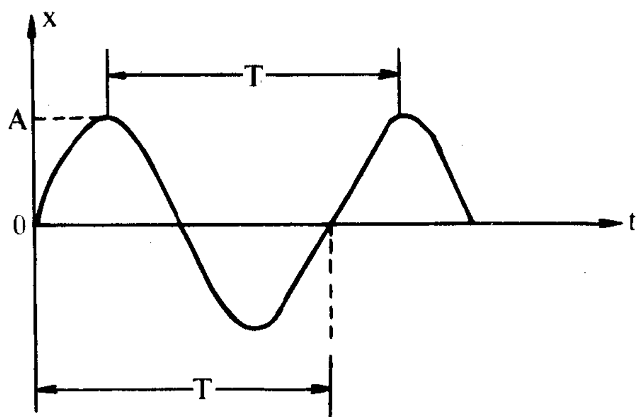


图 2-1 简谐振动

因此，简谐振动是一种重复的、没有衰减的，周而复始的正弦形振动。如正弦交流电、没有粘滞性的液体在“U”形连通管里起伏振动，无阻尼的单摆等。

---

* 除式（2.1）或（2.2）外，简谐振动还有两种表述方法。其一是：

简谐振动的运动微分方程 $$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \qquad (2.3)$$

式（2.1）或（2.2）是式（2.3）的解。式（2.1）、（2.2）也叫简谐振动的运动方程。

其二是：运动物体只受到弹性回复力 $f = -kx$ 时，该物体作简谐运动。$k = m\omega^2$，m 是振动物体的质量，ω 是简谐振动的角频率。

4）简谐振动的三要素

式（2.1）可写成：

$$\begin{aligned}X &= A\sin(\omega t + \psi_0)\\ &= A\sin(2\pi ft + \psi_0)\\ &= A\sin(\frac{2\pi}{T}\cdot t + \psi_0)\\ &= A\sin\psi \end{aligned} \tag{2.4}$$

式（2.4）中A、ψ、T（或频率f、或角频率ω），是简谐振动的三要素。*

A叫做振幅（Amplitude），是简谐振动中物体或物理量运动时距平衡点的最大位移。

ψ叫做位相（Phase）或位相角（Phase Angle），表示各时刻简谐振动的运动状态，它与周期T（或f或ω）和ψ_0有关，ψ_0或ψ'_0叫做简谐振动的初位相（Initial Phase Angle）。它决定于物体的初始状态。

T叫做周期（Period），每经历一个周期T的时间，简谐振动充分回复到原来的状态。也就是说，从任何时刻开始，经过一个周期，简谐振动有完全相同的状态。

T、f、ω之间的关系是：

频率$f=\frac{1}{T}$，角频率$\omega=2\pi f$。

由于
$$\begin{aligned}X &= A\sin(\frac{2\pi(t+T)}{T} + \psi_0) = A\sin(\frac{2\pi t}{T} + 2\pi + \psi_0)\\ &= A\sin(\psi + 2\pi) = A\sin\psi,\end{aligned}$$

因此，经过一个周期T，即$t = t + T$以后，根据sin函数的性质，$\sin(2\pi + \psi) = \sin\psi$，简谐振动有完全相同的位相。

5）傅里叶定理，简谐振动的叠加

简谐振动是最简单的振动。

任何周期振动都可以分解为一系列不同频率、不同振幅、不同位相的简谐振动的叠加。这些不同的频率包括基频、二倍频、三倍频到更多的整数倍频，这就是傅里叶定理（Fourier Theorem）。这种对周期振动的分解，就叫做傅里叶分析（Fourier Analysis）。

写作：

$$X = f(t) = f(t+T) = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i\sin(\omega_i t + \psi_{i0}), \omega_i = i\omega_0, \omega_0 = \frac{2\pi}{T}, \tag{2.6}$$

例如图2-2所画的是一个简谐振动（基频）与一个三倍频和一个五倍频叠加，就有些接近一个方形波了。反过来，方波也可以分解为几个简谐振动。这是频谱分析的基本依据。因此，所有的周期振动都可以通过简谐振动来讨论。

2.1.2 简谐振动的频率

1）频率（Frequency）

频率（或周期）是简谐振动的三个要素之一。频率$f=\frac{1}{T}$，是周期的倒数，是每秒钟内的

---

* 式（2.4）可以写成：

$$X = A\cos(\omega t + \psi_0 - \frac{\pi}{2}) = A\cos(2\pi ft + \psi_0 - \frac{\pi}{2}) = A\cos(\frac{2\pi}{T}t + \psi_0 - \frac{\pi}{2}) = A\cos\psi' \tag{2.5}$$

其各量的意义及讨论都与用sin表示的相应或相同。

振动次数，单位叫赫兹（Hertz），符号是 Hz，简称赫。常用的还有 kHz（千赫）、MHz（兆赫）。人声的频率大概是几百赫（$\sim\times10^2$Hz），女高音可以达到二、三千赫（$2\sim3\times10^3$Hz）。钢琴最低的一个音是 27.5Hz，最高是 4186Hz。中波收音机接收 550kHz～1760kHz 的波段，调频收音机的电波是 50～110MHz 等等。

在音乐声学里我们较多用频率而较少用周期。

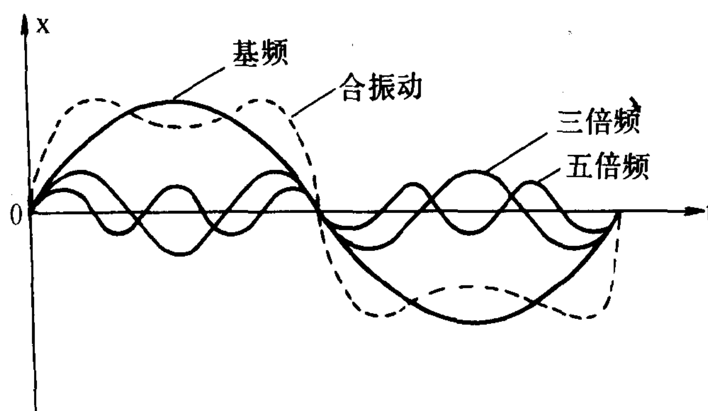


图 2-2 简谐振动的合成

2）几种常见的简谐振动的频率

a. 单摆的振动频率

$$f=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}} \tag{2.7}$$

其中 g 是重力加速度，l 是摆长。可见，摆长越短，即 l 越小，f 越大。

b. 弹簧振子的频率

$$f=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2.8}$$

其中 m 是振子的有效质量，k 是弹簧的是倔强系数。m 越小 k 越大（弹簧越硬），振动频率越高；m 越大，k 越小（弹簧越软），则其振动频率越低。

e. 弦线的横振动频率

$$f=\frac{1}{2L}\sqrt{\frac{T}{\rho_l}} \tag{2.9}$$

其中 L 是弦长，T 是弦线的张力，ρ_l 是弦的线密度，即单位长度的质量。可见弦线越长（L 大），弦线越粗（ρ_l 大），张力越小（T 小），频率越低；反之，频率就高。

d. 活塞里的气柱振动

$$f=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\gamma PA}{ml}} \tag{2.10}$$

其中 ρ 是气柱的压强，l 和 A 是活塞里气柱长度和面积，m 是活塞的质量，γ 是一个常数，对于空气来说，γ=1.40，如图 2-3 所示。

由上述几种情况可知，简谐振动的频率决定于振子物体本身。每种振动物体都有它本身的频率。低音乐器的“个头”都比较大，就是这个道理。

许多乐器或人的发声，都可以近似地看成以上几种模式，并可以找到对应的物理量。

3）物体的固有频率

任何物体都有其自身的振动频率，称为物体的固有频率(Natural Frequency)。

乐器的弦和管有固有频率，音箱、底板、面板、墙板等都有固有频率。许多乐器以其固有频率发声或共鸣。

房屋、桥梁、汽车以至人的体腔等也有固有频率。

物体以其固有频率振动称为固有振动（Natural Vibration）。

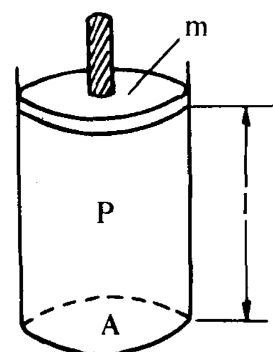


图 2-3　活塞里气柱的振动

2.1.3　亥姆霍兹振子（Helmholtz Resonator）

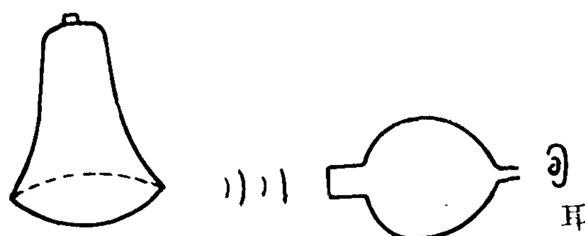


图 2-4　亥姆霍兹振子

亥姆霍兹振子也叫亥姆霍兹共振器，是以德国科学家亥姆霍兹的名字命名的。当初，它是一种用以测听声音和作频谱分析的仪器。如图 2-4 所示。

亥姆霍兹振子的频率

$$f = \frac{v}{2\pi}\sqrt{\frac{a}{Vl}} \quad (2.11)$$

其中 V 是振子的体积，a 和 l 是管口的面积和长度，v 是声速，如图 2-5 所示。

把公式（2.11）与弹簧振子的公式（2.8）相比较，由于管腔内空气的质量 $m = \rho al$，ρ 是空气密度，于是有

$$f = \frac{v}{2\pi}\sqrt{\frac{a}{Vl}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\rho a^2 v^2}{\rho alV}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\rho a^2 v^2}{mV}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.12)$$

$$k = \frac{\rho a^2 v^2}{V}$$

子。通过改变反射孔的长短、大小，可以调节音箱的固有频率。

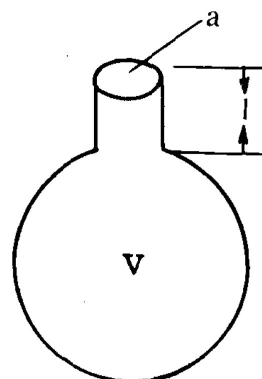


图 2-5　亥姆霍兹振子

2.1.4　简谐振动的振幅和能量（Energy）

简谐振动的振幅是由振动的起始状态决定的。如把提琴的弓拉重些，弦线拨动得幅度大些，嗓子喊得用力些，钢琴击弦的键离弦远些即使发声体振动的振幅大些，出声也就响些。当然，也有一定的限度。

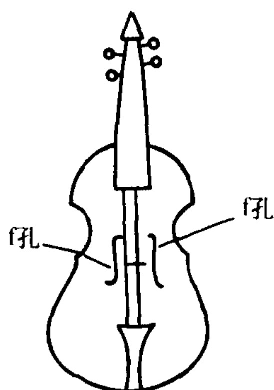


图 2-6　小提琴面板 f 孔

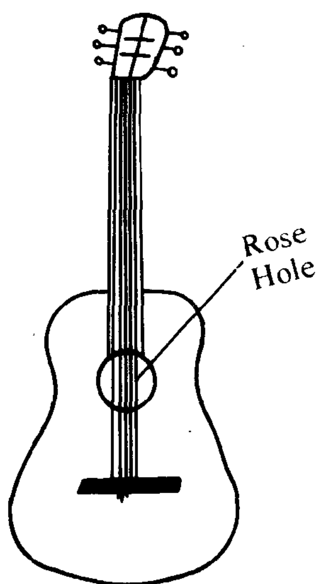


图 2-7　吉他面板上的圆孔

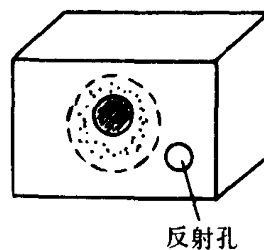


图 2-8　带反射孔的喇叭箱

从上述的例子中也可以看出，简谐振动的振幅是与能量有关的。振幅越大，振动的能量越大。我们知道，机械能等于动能和势能两种能量之和。我们又知道，简谐振动是一种能量不损耗的振动。我们且不去考虑重力势能，只考虑弹性势能。因此，当简谐振动的动能最大时，弹性势能最小；当弹性势能最大时，动能最小。我们取振子处于平衡位置时的最小势能为零。则弹簧振子的弹性势能（Elasic Potential Enery）$E_p = \frac{1}{2}kx^2$　　(2.14)

其中 x 表示振子的振动位移，动能（Kinetic Energy）$E_k = \frac{1}{2}mV^2$　　(2.15)

其中 v 是振子的振动速度，m 是振子的有效质量。

总能量（Total Energy）$E = E_p + E_x = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2$　　(2.16)

最大势能（Maximum Potential Energy）$E_{pmax} = \frac{1}{2}kA^2$　　(2.17)

等于最大动能（Maximum Kinetic Energy），$E_{kmax} = \frac{1}{2}kv_{max}^2$　　(2.18)

公式（2.17）中 A 是振子振动的振幅，公式（2.18）中 v_{max}是振子振动的最大速度（Maximum Velocity）。

由于已规定 E_k 最大时，$E_p = 0$，又知 E_p 最大时，$E_k = 0$，于是有 $E = E_{pmax} = E_{kmax}$　　(2.19)

参看图 2-9。

我们再看一下弦的横振动的势能：

$$E_p = \frac{1}{2}\frac{2T}{L}x^2 \qquad (2.20)$$

其中 x 是弦中点的位移。写成这种形成是便于与$\frac{1}{2}kx^2$ 比较。这里$\frac{2T}{L}$相当于 k。

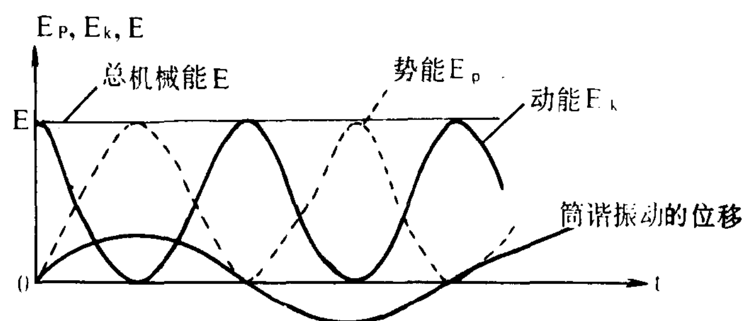


图 2-9　简谐振子的动能和势能

最大势能 $E_{pmax}=\frac{1}{2}\frac{2T}{L}A^2$　(2.21)

等于最大动能，等于总能量。A 是弦中点的振幅。

体积为 V 的空气振动的势能 $E_p=\frac{1}{2}\frac{V}{P_0}p^2$　(2.22)

其中 P_0 是大气压强，p 是压强比大气压强大出的部分。以后可知，p 就是声压。

2.1.5　同方向振动的简谐振动的合成，拍（Beat）

两个振动方向相同、频率为 f_1 和 f_2 的简谐振动叠合以后，可以产生频率 $f=f_1-f_2$，即差频（Difference Frquency）或 $f=f_1+f_2$，即和频（Sum Frequency），或 $f=2f_1-f_2$，$2f_1+f_2$，$3f_1-2f_2$……n（f_2-f_1）等的振动。

当 f_1 和 f_2 相近时，f_1-f_2 很小，可能被听出来。比如，当 $f=f_1-f_2=n$ 时，出现 $f=n$ 即每秒 n 次的频率，称为拍频（Beat Frequency）。反过来，根据拍频，我们可以知道两个振动的频率差。

历史上，在 1700 年，法国物理学家索维尔（Sauveur，1653-1716）用两根管长比为 25：24 的风琴管做实验，根据其拍频为 4，得知高音管的基频是 100Hz，低音管的基频是 96Hz。

拍的现象还有很多用处。例如，键盘式手风琴（Accordion）的两排中音簧就故意制作得频率相差一些，例如约相差 5～10Hz。由于产生拍频，听起来有颤音。而纽扣式手风琴（巴扬 Баян）则是单簧片的，声音听起来单纯，有直嗓子“喊叫”的味道，体现出俄罗斯民间风格。

钢琴调律时，也利用拍的现象，来判断各个音是否调准了。有的音乐家甚至主张把钢琴同一音的几根弦的频率调得差一点点，以有颤音的效果。

弦乐器调弦时，把一根空弦与旁边一根发出相同音高的弦同时拉响，听是否有拍音，用以判断弦是否已调准了。

2.1.6　阻尼振动

1）阻尼振动（Damping Vibration）

振幅随着时间衰减的振动叫阻尼振动。

如果没有外界给予能量补充，绝大多数的振动是要衰减的。也就是说，实际存 的振动大多是阻尼振动。

阻尼振动也有三个要素，即振幅、周期和位相。与简谐振动不同的是，阻尼振动的振幅随时间变得越来越小。

常见的一种阻尼振动的振幅是以指数形式衰减的，即*）

$$X = A\sin(\omega t + \psi_0) \qquad (2.23)$$

$$A = A_0 e^{-\beta t} \qquad (2.24)$$

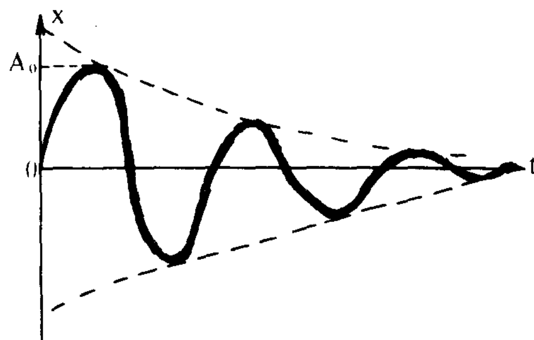


图 2-10　阴尼振动

公式 (2.24) 中 A_0 是初振幅 (Initial Amplitude)，即 t=0 时的振幅。在什么时刻取 t=0 是任意的，即不一定取阻尼振动开始时间为 t=0。β 叫做阻尼度，β 越大，振幅衰减得越快。公式 (2.24) 的振动如图 (2-10) 所示。

2）阻尼振动的 Q 值 (Q Factor)

阻尼振动的品质因数 Q 表示在一个周期里相对能量损失的倒数的 2π 倍，即：

$$Q = 2\pi \times \frac{\text{系统贮存的能量}}{\text{一个周期内损耗的能量}} \qquad (2.27)$$

当 β 很小时，

$$Q \approx \frac{\omega_0}{2\beta} \approx \frac{\omega}{2\beta} \qquad (2.28)$$

可见：振动衰减得越快，Q 值越小。

手风簧片振动的 Q 值小，钢琴的弦振动的 Q 值大。Q 值与传远也有关。为了使音质评价量化，应把 Q 值作为乐器的声学参数之一。

3）阻尼振动的应用

阻尼振动有时是有益的，有时是有害的。地震仪记录地动时如果不衰减或衰减很慢，那么记录接连的两个地震就会重叠起来；如果阻尼过大，那么又会测不出周期来。

在音乐声学中，如果乐器的振动衰减过快，延续时间过短，则传递出来的能量很小；但有时衰减太少也会引起麻烦。如圆钟衰减太慢，只能在寺庙中、教堂里使用，延时很长，传声很远；而作为具有音阶的乐器的编钟，则是用两块铸件对起来的扁钟，使声音不致相扰而“不成律”。演奏吉他或其他拨弦乐器时，常常在弹奏后用手迅即压住琴弦，得短促音，也是使弦的振动迅即衰减。手风琴的振簧衰减较快，而钢琴的琴弦振动衰减较慢，因此，在近处听两者声响相差不大，而在远处则只能听到钢琴声。电子琴就更不好了。如果振动系统的阻尼太大，就不能振动了，叫做过阻尼。

2.1.7　受迫振动，共振，共鸣

1）受迫振动 (Forced Vibration)

当周期性的外力作用在振动系统时，物体会产生受迫振动，这个外力叫做策动力。达到

---

* 公式 (2.23)、(2.24) 是有阻尼力 $f_{阻} = -2\beta mv$ 的运动微分方程 $\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0$　(2.25) 的解。其中 m 是振子的质量。ω_0 是系统固有角频率。阻尼振动的角频率 ω (式 2.23) 与自由振动的角频率 ω_0 的关系是：$\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2$　(2.26)

稳定后，物体不再以他自身的固有频率振动，而是以策动力的频率振动。

如果振动系统受弹性回复力-kx，阻尼力-2βmv，周期性的策动力 Fsinωt 的作用，则有振动微分方程

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = h\sin\omega t \tag{2.29}$$

式中 $\omega_0^2=\frac{k}{m}$，$h=\frac{F}{m}$，m 是系统的质量。

当振动达到稳定后，有

$$x = H(\omega)\sin(\omega t-\phi) \tag{2.30}$$

即受迫振动的振幅

$$H(w) = \frac{h}{\sqrt{(\omega_0^2-\omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}} \tag{2.31}$$

式（2.30）中 ψ 是 x 与策动力的位相差。

当策动力的角频率

$$\omega_{共振} = \sqrt{\omega_0^2-2\beta^2} \tag{2.32}$$

时，H（ω）有极大值，即产生共振。

用弓弦拉提琴，是给弦线加以外力，但这外力不是周期性的，琴弦这是以它固有的频率振动，这不是受迫振动。

2）共振（Resonance）

当策动力的频率 f 与物体固有频率 f_0 近乎相等时，会产生“共振”现象。这是因为在每一个周期内，策动力不断给系统补充能量而没有抵消掉。像我们摆动秋千一样，每次都顺着原来的振动加给一份力，秋千就越荡越高。

共振有好处，也有害处。人所共知，士兵过桥必须改便步走，以免步伐的频率与桥的固有频率相近而踏塌了桥。7～8Hz 的次声波会引起人的内脏共振而致人死命。

我国古代的“汉洗”，即是利用共振原理制造的。如图 2-11 所示。当在“洗”的两个“耳朵”上摩擦，其频率与“洗”的固有频率相近时，就产生共振，使里面的水花跃出水面。



图 2-11　汉洗

抗震的房屋要用框架连接起来，主要是避开地震的振动周期。船体、车身都要避免与发动机产生共振。共振筛则可用于选矿。

3）共鸣（Resonance）

音乐声里的共振叫共鸣。唱歌要有共鸣区、共鸣点，低音用胸腔共鸣，高音用头腔共鸣。

琴箱与琴弦共鸣，才能听到小提琴演奏的声音。仅仅是一根弦的振动，发声很小，几乎听不到声响。好的琴箱在许多频率上都可产生共鸣，形成了一个共鸣区。差的琴箱则不是这样。“共振峰”（Formant）是指某一共鸣区的中心频率，是表示乐器性能的一个名词。

我国古代早就发现了共振和共鸣现象，并且还做了实验。公元前三、四世纪的《庄子》一书中写道：“为之调瑟，废（置）于一堂，废于一室，鼓宫宫动，鼓角角动，音律同矣。夫改

调一弦，于五音无当也，鼓之，二十五弦皆动。”这里记载的是一次在一个房间里调瑟的实验，调动一个琴上的弦，其他琴上的同名弦也发声。也可以说这是世界上最早的共振实验。《吕氏春秋》也记有：“类固（同）相召，……声比则应。”也是说调到音高相同可以发出共鸣。西汉董仲舒在《同类相动》中也指出：“气同则会，声比则应……五音比而自鸣也”。

南北朝宋人刘敬叔在《异苑》中有一段记载：“晋中朝时，蜀中有人蓄铜澡盆，晨夕恒鸣如人叩。乃问张华。华曰‘此盘与洛阳钟宫商相谐，宫中朝暮撞钟，故声相应。可𨰿（lu）令轻，则韵乖鸣自止也’，依其言，即不复鸣。”“𨰿令轻”，即磨掉一些，让它轻些，“韵乖”即音调变了。这说明了当时已知物体的固有频率与轻重有关，也提出了消除共振的方法。

唐韦绚选的《刘宾客佳话录》中也有一个故事：洛阳某僧房中的磐经常自鸣，“僧惧成疾”。即吓出病来了。僧人的朋友曹绍夔知此之后，向僧人问侯。等过一些时侯，他要僧人次日设宴招待。第二天，当斋钟敲时，磐亦作声，饭后，曹“出怀中锉，𨰿磐数处而去，其声遂绝。僧问其所以？绍夔曰：此磐与钟律合，故击彼此应，僧大喜，其疾便愈。”

宋沈括设计了一个“应声”实验。他剪了一个纸人，固定在一根弦上。弹动频率与该弦的频率成整数比的弦时，纸人便跳动；弹动其他弦时，纸人不动。他在《梦溪笔谈》中写道：“琴瑟弦皆有应声；宫弦则应少宫（高八度的宫音），商弦则应少商（高八度的商音），其余皆隔四相应。”因当时是五声音阶，隔四根弦，即差一个八度，频率比为1：2，就发生共振。他进一步指出：“音律高下苟同，虽在他琴鼓之，应弦亦震”，就是说即使不是一个琴，也会产生共鸣。他的朋友有一个琵琶，放在空房中，用燕乐奏“双调”（燕乐二十八调中的一种调）时，琵琶也会发声，朋友视为宝物。他说：“殊不知此乃常理。二十八调但有声同者即应”。他已经把共鸣看作是普遍现象了。

§2.2 波（Wave）

2.2.1 波的定义，波的四要素

1）波的定义

波是振动的传播，说得再确切一些，是振动状态的传播，即振动方向、振动位相或振动能量的传播。要特别指出的是波的传播并不是介质或物理量本身的朝前运动。

2）波的四个要素

波要有波源。波源就是振动源，也叫振源。

振动要传播，才能成为波。因此，波比振动要更为复杂些，有四个要素，即除了振动的三个要素即振幅、位相、（振动的）频率以外，还有一个波的传播速度，或者在后面要讲的波长。

简谐 波是简谐振动的传播。与讨论振动一样，我们把简谐波作为最简单的波来讨论。其他的波都可以看成一系列不同的简谐 波的叠加。

3）机械波，电磁波，物质波

机械波、电磁波都是常见的波，物质波则是物质的一种普遍存在形式。

机械振动的传播，即物质质点位置振动的传播，叫做机械波（Mechanic Wave）。如水波、声波、地震波等。机械波要通过介质传播。

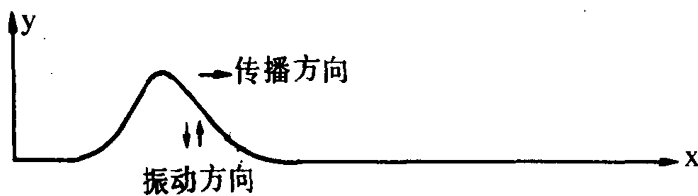
电磁场振动的传播叫电磁波（Electro-Magnetic Wave），如无线电波、光波等。电磁波的传播不需要空间介质。

物质波（Matter Wave）是指任何一个物质都可以被看成波。如同光子同时也是光波，电子同时也是电子波一样。人体及一切宏观物体也都同时是一种物质波，不过其波长极大而已。

2.2.2 横波、纵波

1）横波（Transverse Wave）

介质或物理量振动方向与波的传播方向相垂直的波叫做横波。例如，向一个方向抖动绳子，如图 2-12 所示，波朝 x 方向行进，而绳子的质点在 y 方向上下运动。光波是电磁波的一种，电磁波也是横波。横波传播时与波的传播方向垂直的是一个面，在这个面里，振动还可以有不同的方向，如图 2-13 所示。



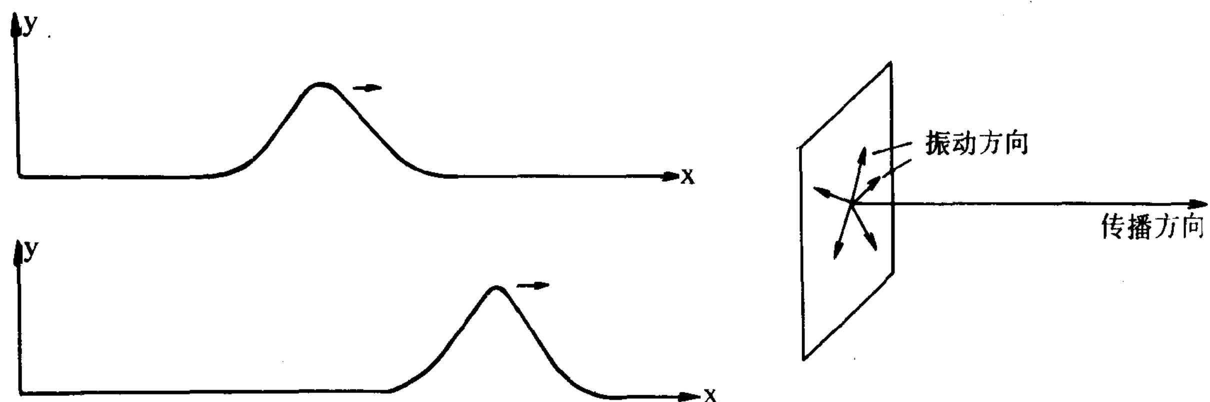


图 2-12 横波—绳的振动的传播

图 2-13 横波

介质或物理量的振动方向与波的传播方向相同的波叫做纵波，如声波等。纵波也叫疏密波或压缩波。如图 2-14 所示。

有许多波同时存在横波和纵波，例如地震波中的 P 波（Primary Wave）是纵波，传播速度快，所以首先到达。S 波（Secondary Wave）是横波，传播速度慢，第二到达。根据 P 波与 S 波到达的时间差及 P 波和 S 波的传播速度，可以测定震中距离台站多远。

水波不是纯粹的横波，它有纵波的成分。水波传播时水分子实际上在原地附近做椭圆形运动。

2.2.3 波前，平面波，球面波

1）波前（波面，波阵面）（Wave Front）

某一个时刻，同位相的振动传播到达的点的集合叫做波前。波前也叫波面或波阵面。波阵面是平面的波叫平面波；波阵面是球面的波叫球面波。一般情况下，平面振源发出的波是

平面波，点源发出的波是球面波。如图 2-15 所示。

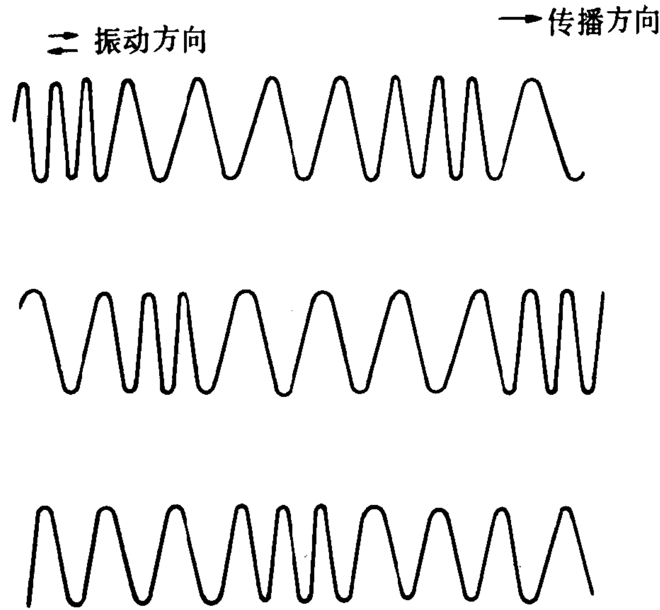


图 2-14　纵波

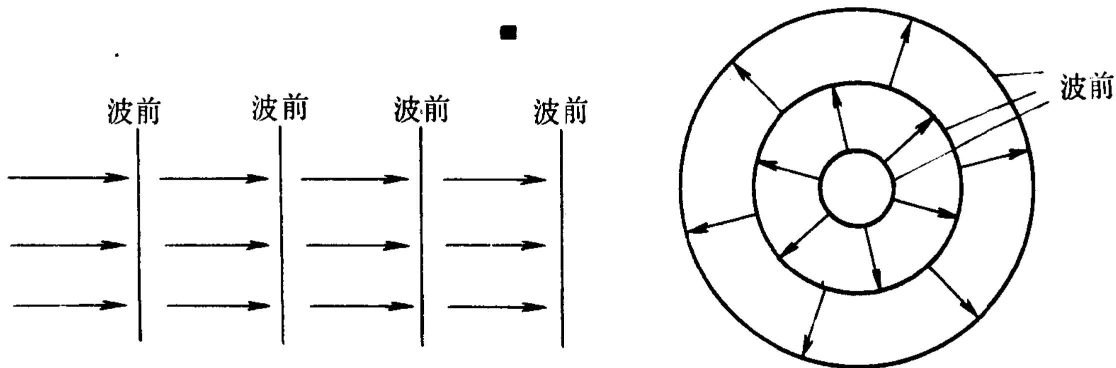


图 2-15（a）　平面波的波前　　　　图 2-15（b）　球面波的波前

2）平面波（Plane Wave）

沿 x 正方向传播的平面波的运动方程为

$$S = A\sin[2\pi f(t - \frac{x}{v}) + \psi_0] \tag{2.33}$$

从式（2.33）可以看出，s 是 x 和 t 的函数，也就是说，要表示一个波，需要描述在波的传播方向上不同位置 x 的不同时刻 t 的振动。同一位置，不同时刻，介质或物理量的振动状态是不同的；同一时刻，在空间的不同位置，介质或物理量的振动状态也是不同的。可以画出 s-x 图和 s-t 图，如图 2-16 所示。

与振动的表示式不同的是，波动方程位相中的时间项 t 多了一个因子 $-\frac{x}{v}$，即原来的 t 变成了 $t'=t-\frac{x}{v}=t-t_0$。由于波的传播速度是 v，所示 $t_0=\frac{x}{v}$ 正好是波从 x=0 到达 x 处所花费

的时间。换句话说，当$t=t_0$时，$t-\frac{x}{v}=0$。即t时刻在x处的振动正好是$t=0$时刻（也即时间向前推移t_0时）$x=0$处的振动。或说在x处波的位相比$x=0$处落后时间t_0。

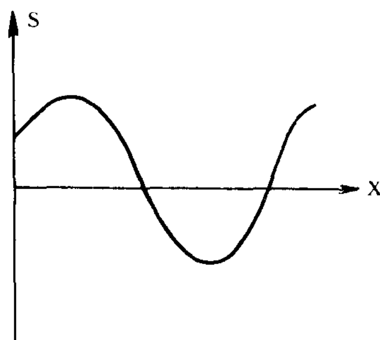


图 2-16　平面波（a）s—x 图

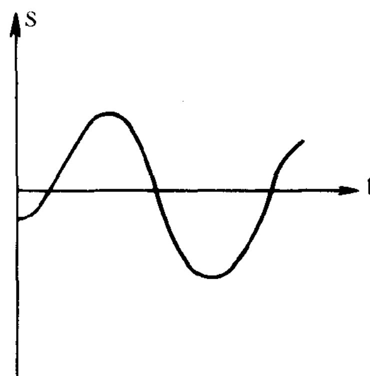


图 2-16　（b）s-t 图

3）球面波（Spherical Wave）

从波源$r=0$处朝径向r传播的球面波的表达式为：

$$S=\frac{A}{r}\sin\left\{2\pi f\left(t-\frac{r}{v}\right)+\psi_0\right\},(r\neq 0) \tag{2.34}$$

公式中r是球面波传播的距离，A是波源的振幅。公式（2.34）表明球面波的振幅与传播距离成反比。这一点很好理解，因为球面的面积与r^2成正比，随着r增大，能量的分布面积也增大，即使阵面单位面积的能量与r^2成反比。又知振动能量与振幅的平方成正比，所以球面波的振幅是$\frac{A}{r}$。由此可见，从发声处向各处传播声音，即使振动本身没有衰减，传播时没有损失、听起来远处声音也要小得多。

若距波源相当远处，在一个小范围内，球面波也可以近似地看作是平面波。

2.2.4　波长（Wave Length）

波在振动一个周期内传播的距离叫做波长。

先让我们来描述一下波的传播，如图2-17所示，假定这是一个机械横波，介质分子在$t=0$时、$x=0$处正自于振幅最大处，然后这一处的介质质点就把振动逐点传递到相邻的分子，引起朝x方向前方的介质质点振动，就形成了波。

在这里，介质的质点在原处上下振动，而波则向横向x方向传播。

---

* 公式（2.33）是波动微分方程

$$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2}=v^2\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} \tag{2.35}$$

的解。

公式（2.34）是波动微分方程

$$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2}=v^2\left(\frac{\partial^2 s}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 s}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 s}{\partial z^2}\right)=v^2\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} \tag{2.36}$$

的解。

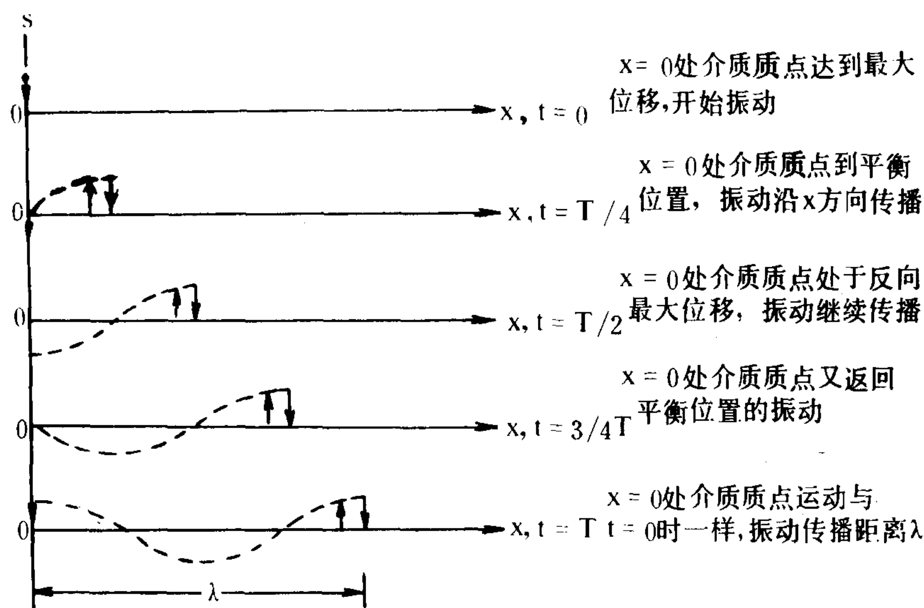


图 2-17 波的传播

从图 2.17 可以看出，当经过一个周期以后，介质质点的振动又回复原样，而波却传播了一定的距离。这个距离就是波长。或说波长是波列在传播中某一时刻相邻两个同位相点之间的距离。波长：

$$\lambda=vT，\text{或} T=\frac{\lambda}{v}，\text{或} v=\frac{\lambda}{T}=f\lambda^{*} \tag{2.37}$$

因此，已知频率以后，有时用波长 λ 来描述波的传播，有时也用波速 v 来描述波的传播。

v 是波的传播速度，与振动质点的运动是两码事，不要混淆。

2.2.5 驻波 (Standing Wave)

振动频率、振幅和传播速度相同而传播方向相反的两列波叠加合时，就产生驻波。** 比如水波碰到岸边反射回来时，前进和反射波的叠合就产生驻波。

---

* 利用波长 λ，式 (2.33) 可以写成

$$S=A\sin\left\{2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda}\right)+\psi_0\right\} \tag{2.33'}$$

式 (2.34) 可以写成

$$S=\frac{A}{r}\sin\left\{2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{r}{\lambda}\right)+\psi_0\right\} \tag{2.34'}$$

** 向 x 正方向传播的前进波表示为

$$S_1=A\sin\left\{2\pi fct-\frac{x}{v}+\psi_0\right\} \tag{2.38}$$

向 x 反方向传播的反射波表示为

$$S_2=A\sin\left\{2\pi fct-\frac{x}{v}+\psi_0\right\} \tag{2.39}$$

两个波列叠加，有

$$\begin{aligned}S&=S_1+S_2=2A\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)\cdot\sin(2\pi f+\psi_0)\\&=A_1\sin(2\pi f+\psi_0)\end{aligned} \tag{2.40}$$

这是一个振幅为 $A_1=2A\cos\frac{2\pi}{\lambda}x$、频率为 f 的简谐振动，$A_1$ 只与 x 有关。当 $x=\pm k\cdot\frac{\lambda}{2}$（k=0，1，2，……）时，$A_1=\pm 2A$，是波腹。当 $x=\pm k\cdot\frac{\lambda}{4}$（k=1，3，5……）时，A=0 是波节。式（2.40）即为驻波方程。

驻波形成时，空间各处的介质点或物理量只在原位置附近作振动，波停驻不前，而没有行波的感觉，所以称为驻波。如图 2-18 所示。形成驻波时，各处介质质点或物理量以不同的振幅振动。振幅最大处叫波腹，振幅最小处即看上去静止不动处叫做波节。相邻两个波节或波腹之间的距离是半个波长。

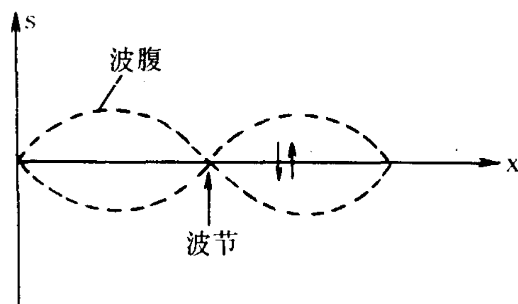


图 2-18　驻波

利用弦上的驻波或管内形成的空气柱的驻波可以测定波的频率。

把耳朵放在空的广口瓶或暖瓶上方倾听，可以听到嗡嗡的响声，这是空气在瓶内形成声驻波，瓶底是波节，瓶口外是波腹，瓶的深度即“管长”，是四分之一波长。往暖瓶里灌开水时，随着水面的上升，可以听到逐渐升高的音调，这是空气在暖瓶内从水面到瓶口处形成了驻波，并在瓶口外形成波腹，随着水面的上升，水面到瓶口的距离即“管长”不断变短，形成的驻波的频率也不断升高的缘故。

2.2.6　多普勒效应

当波源与波的接收者之间以一定速度作相对运动时，接收者所接收到的频率（或波长）就会改变，这就是多普勒效应。(Doppler Effect)

当波源与接收者之间做相向运动即相互靠近时，接收者接收到的频率就会升高；当波源与接收者之间作反向运动即相互远离时，接收者接收到的频率就会变低。例如，听疾驶而来的火车鸣笛声，先是升高，然而当火车擦身而过再向后驶去时，笛声又突然降低。夏天，树上有蝉鸣，你把扇子面对着蝉声摇动，并把耳朵贴在扇旁，则在耳畔可以听到随着你摇扇的节律出现音调的高低的变化。这也是多普勒效应。

下面的图 2-19 可以较形象地告诉你，当波源向接收者靠近时，两个波阵面之间的距离即波长变小了，于是频率变高了；反之亦然。

当介质静止、波源或观察者运动速度不大时，接收者听到的频率 f 用公式表达为

$$f=f_0\left(1+\frac{u}{v}\right)^{*} \qquad (2.41)$$

---

*

$$f=f_0\frac{v-u_0}{v-v_0}\approx f_0\frac{1-\frac{u_0}{V}}{\frac{1-v_0}{v}}\approx f_0\left(1-\frac{u_0}{v}+\frac{v_0}{v}\right)$$

$$=f_0\left(1+\frac{v_0-u_0}{v}\right)=f_0\left(1+\frac{u}{v}\right) \qquad (2.42)$$

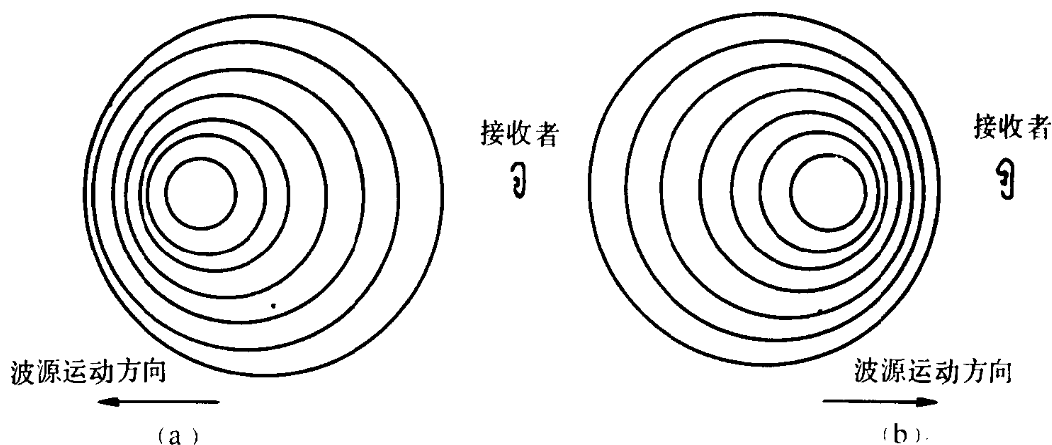


图 2-19 多普勒效应

公式（2.41）中 f_0 是波源的频率，v 是波速，u 是波源与观测者的相对运动速度。当 $u>0$ 时，$f>f_0$，当 $u<0$ 时，$f<f_0$。

公式（2.42）中 v_0 是波源运动速度，u_0 是接收者运动速度，$u=v_0-u_0$。

多普勒效应已被广泛应用。如证明运动的星体离我们而去，在光谱线上出现的“多普勒红移”，马路上检测汽车是否超速行驶，地震工作中用以确定地震时断裂面的走向，以至测定流体的流速，研究血液的运动等。

§2.3 声波（Sound Wave）

2.3.1 声波的性质

1）声波是在介质中传播的机械波

声源的振动是机械振动。声波是在介质中传播的机械波。介质可以是气体、流体、固体或等离子体等，即使是电子乐器由电子振荡器作为振源，你听到的还是到达耳膜的空气的振动或通过人体传递达到耳朵的振动。

机械振动是通过介质质点的振动带动相邻的介质质点振动，由此逐步一点一点传递的。没有介质，声波就不能传播。你可以做一个实验，在钟罩里放一只电铃，听到它振动发声。然后抽去钟罩里的空气，你会听到铃声逐渐变弱，以致几乎完全听不见。这说明没有空气或其他物质作为介质，声波不能传播。

2）声波是纵波。

关于纵波的特点，前面已经介绍过。我们的耳朵听到的声音就是空气的压缩和舒张刺激耳膜而产生的。

3）声速（Velocity of Sound）

声波的传播有一定速度。在空气中传播的声速与介质的温度有关，即：

$$v = 331.5 + 0.6t \text{ m/s} \tag{2.43}$$

t 是摄氏温度数（℃）。如室温为 14℃～15℃，则 $v \approx 340 m/s$。所以在不作精确要求时，我们常把空气中的声速以 $v = 340 m/s$ 来计算。

声波在流体中和固体中传播的速度比在空气中传播的速度要快。表 2.1 中列出了在一些介质中传播的声速的数值。由此可见流体中的声速数倍于气体中的声速，而固体中的声速比气体中的高出一个数量级。因此印第安人用耳朵贴在地面上听远处的马蹄声；把耳朵贴在铁轨上比站在路基旁可以提前听到驶来的火车声响。

弹性介质中传播的平面纵波的波速：

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.44)$$

式中 ρ 和 E 分别是介质的密度和杨氏弹性模量。

绝热过程中，空气中的声速

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (2.45)$$

式中 P 是空气压强，ρ 是空气密度，γ 是定压比热容与定容比热容之比。对于空气 $\gamma \approx 1.40$。

可以证明，如果在空气中传播的声速是绝热的，则声速与压强无关。

表 2.1　一些材料中的声速 v 和声阻抗 ρv

材料	v (m/s)	ρv (kg/m²·s)
空气（15℃）	340	410
水蒸汽（100℃）	405	242
淡水（15℃）	1481	1.48×10^6
海水（15℃）	1500	1.54×10^6
玻璃	3100	8.0×10^6
松木	3500	1.57×10^6
铝棒	5150	13.9×10^6
钢棒	5200	12.0×10^6

4）声阻抗（Acoustic Impedance）

声波在其中传播的介质的密度与声速的乘积 ρv 叫做声阻抗或声阻。当声波在两种不同介质中传播时，如果两者的声阻抗相差越大，声波的反射成分就越大。极端地说，在完全相同的介质中，理想地想象一个面，则这个理想面的两侧是同一种介质，有相同的声阻抗，于是声波没有反射。在刮风天气声音不能传远，除了风声掩盖等以外，空气疏密变化造成反射损失，也是使声波有传播损失的一个原因。表 2.1 中同时列出一些介质的声阻抗。

5）声场（Sound Field）

声波存在的空间叫做声场。这与电场、引力场等概念是相似的。

常被研究的声场有扩散声场，即声源向四方传播，没有反射，这可以用消声室模拟；有广场声场，即除地面反射外，其他方向的声波没有反射，这也可以用半消声室模拟；还有音乐厅、剧院等室内声场以及录音室、试听室中的室内声场等。当前研究的还有家庭室内声场、

汽车声场、机舱内的声场等。

6）基频、谐波、分音

一般的声波都不是纯粹的正弦波，前面已经讲过，所有的周期振动都可以分解成各种频率、振幅和位相的正弦波，看成是它们的叠加。我们把频率最低的叫做基频(Foundamental Frequency)，其倍频叫做谐波（Harmonics）或泛音（Over Tone）。

分音(Partial)是比谐波更加广泛的含义，除谐波外，还包括不完全是整数倍频的非谐波。现时常只把非谐部分称分音。低于基频的谐波称为次谐波。次谐波存在时，听感有时会"听到"较低的频率。

2.3.2 声压，声功率，声强，声压级，功率级，声强级

1）声压（Sound Pressure)、声压级（Sound Pressure Level)

由于声波是压缩波亦即是疏密波，在声波传播时，介质被部分地压缩和扩展，引起其密度的变化，以气体为例，根据气体的状态的方程

$$PV = \frac{m}{\mu}RT \qquad (2.46)$$

写成

$$P = \frac{m}{\mu}\frac{RT}{V} = \rho\frac{RT}{u} \qquad (2.47)$$

式（2.46)、(2.47）中 P、V、m、μ、ρ、T 分别是气体的压强、体积、质量、摩尔分子量、密度和绝对温度，R 是气体普适常量。由公式（2.47）可知，气体的压强随密度成正比变化。

声波在大气中传播时，空气时疏时密，密度时小时大，也即局部的大气压时高时低。我们把这瞬时的大气压 Pt 与静止的大气压强也即平均大气压强 P_0 之差称之为声压，即瞬时声压

$$p_t = P_t - P_0 \qquad (2.48)$$

我们常说的声压是平均声压或有效声压，平均声压

$$\bar{p} = \frac{1}{T}\int_0^T |p_t| dt \qquad (2.49)$$

如果是简谐声波，则用有效声压 P，即瞬时声压的方均根值。

$$p = \frac{p_m}{\sqrt{2}} \qquad (2.50)$$

p_m 是声压幅值，也叫最大声压。如果不特别声明，则声压是指有效声压。

声压的单位就是压强的单位 Pa（帕)。$1Pa = 1N/m^2$（牛顿/米^2)。

声压是一个很小的量。在频率 $f \approx 1000Hz$ 时，一般人的听阈，即刚刚能听出来的声压值为 $2\times10^{-5}Pa$，在教室里高声讲课的声压约为 $10^{-1}Pa$，十米外喷气飞机发动机的声压约为 $2\times10^{-2}Pa$。这是人耳的痛阈，即对一般人来说再大的声压就忍受不了了，而一个大气压约为 1×10^5Pa。

由于人耳的听觉范围很宽，达 7 个数量级。所以用对数来表示声压，取声压级。

$$SPL = 20\lg\frac{p}{p_0} \qquad (2.51)$$

把一般人在空气中的听阈的下限 $2\times10^{-5}Pa = 20\mu Pa$ 取作 p_0。则当 $p = p_0$ 时，SPL=0；p

$=2\times10^{2}$Pa 时，SPL=140。声压级的单位叫 dB（分贝）。下面列出一些状况下的声压和声压级。如图 2-20。

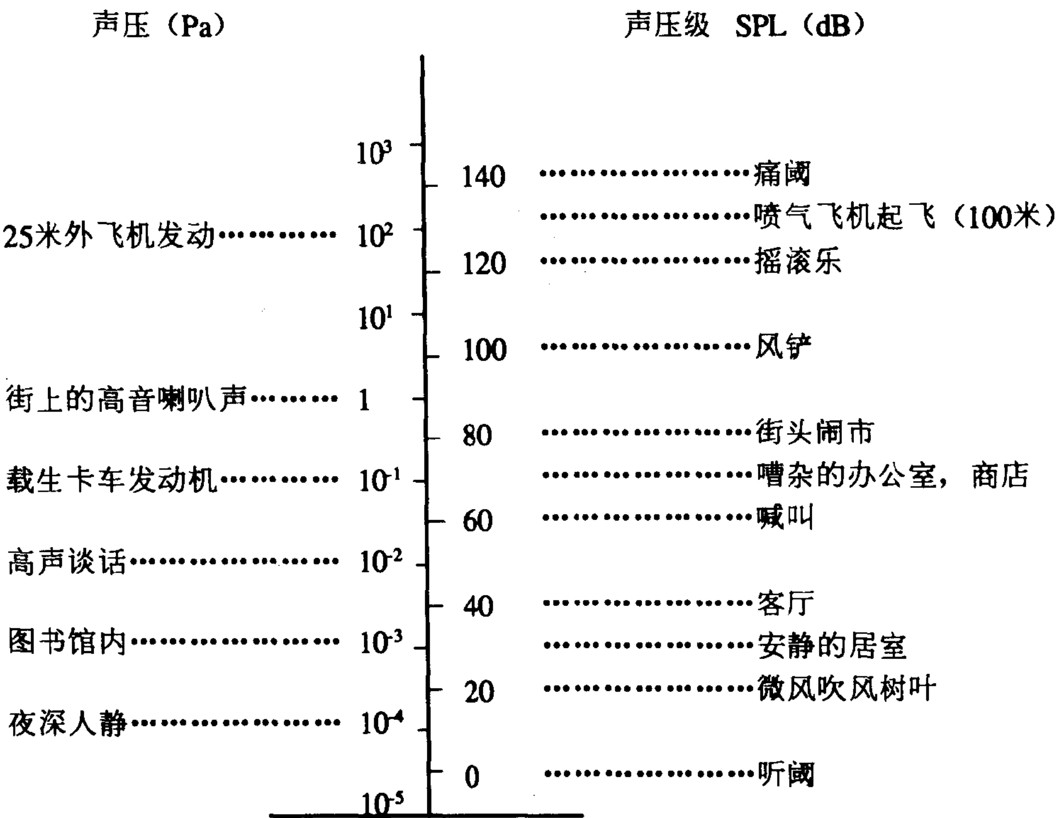


图 2-20　一些状况下的声压和声压级

由公式（2.51）可知，声压增大为 10 倍，即高一个数量级，声压级增加 20dB。

在液体中的声压级取 $p_0=1\mu Pa$。在不讲明的情况下，一般指 $p_0=20\mu Pa$。（*

2）声功率（Sound Power），功率级（Sound Power Level）

声功率是对声源而定的，是指声源每秒所发出的能量，以瓦特（瓦）为单位，符号是 W，1W=1J/s（焦耳/秒）。例如，极轻的微微细语约为 10^{-8}W，高声唱歌约为 10^{-4}W，喷气飞机发动机为 10^{5}W=100kW 等。

与声压一样，我们还用对数来表示，即声功率级

$$SWL = 10\lg\frac{W}{W_{ref}} \tag{2.52}$$

一般取参考声功率：

$W_{ref}=1\times10^{-12}$W=1PW（皮瓦），这是一般人刚刚可以听出来的声功率。于是，10^{-4}W 的功率级为：

$$SWL = 10\lg\frac{10^{-4}}{10^{-12}} = 80\text{dB}$$

声功率每提高 10dB，实际功率大 10 倍。

3）声强（Sound Intensity），声强级（Sound Intensity Level）

我们把通过每单位面积传递的声功率称为声强，其单位是 W/m^2（瓦/米^2）。平面波的声强不变，球面波的声强与传播距离的平方成反比。同样，我们用声强级来表示。声强级与功率级有同一数值：*

$$SIL = 10\lg\frac{I}{I_{ref}} = SWL \tag{2.53}$$

由于声强和声功率都难以直接测量，所以我们还是常用声压级来表示。在特定条件下，声强级与声压级有同一数值。

声强与声压的平方成正比。

2.3.3 声波的传播，声的绕射、反射和折射，声波的独立传播定律

我们知道，机械波在均匀介质中传播时，传播方向不会改变；机械波在非均匀介质中传播时，会改变方向；当机械波从一种介质传播到另一种介质的界面时，会发生反射而或折射，即一部分反射，一部分透射，一部分被吸收；当波在传播中遇到障碍时，会发生绕过障碍的现象，声波就是这样的。这一节我们来讨论声波在传播中的这些现象。

1）惠更斯原理

惠更斯提出：波所到达的每一点，都可以看作新的波源，从这些新的波源发出次波来，新的波前就是这些次波的包迹。这就是惠更斯原理（Huygens' Principle）。惠更斯原理告诉我们，根据某一时刻的波前的位置，可以确定下一时刻的波前的位置，从而确定波的传播方向。包迹亦叫包络线，次波的包迹就是包住这些次波的轨迹线。

假设从波源 D 处发出的波，在均匀介质中以速度 v 向四周传播，在时刻 $t=t_1$ 时的波前是以半径为 R_1 的球面 s_1，$R_1=vt_1$。根据惠更斯原理，经过 δt 时间，亦即在 $t=t_2=t_1+\delta t$ 时刻，波前的位置是以 s_1 面上的各点作为新的波源，以 $r=v\delta t$ 为半径作的圆的包迹 s_2，如图 2-21 所示。新的波前是以 O 为球心，$R_2=R_1+r$ 为半径的球面。

$$R_2 = R_1 + r = vt_1 + v\delta t = v(t_1+\delta t) = vt_2$$

可见根据惠更斯原理得出的由 s_1 面出发在 $t=t_1+\delta t$ 时刻的波前，与看作从波源出发经过时间 t_2 所达到的波前，即以 O 为球心，$R_2=vt_2$ 为半径作的球面是一样的。

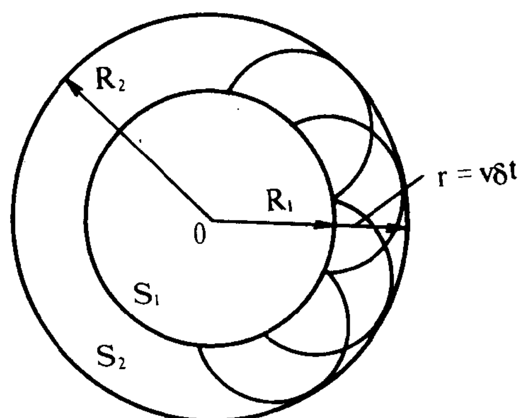


图 2-21 惠更斯原理—球面波

对于在均匀介质中传播的平面波，同样可以用惠更斯原理得出下一时刻的波前的位置，如图 2-22。

---

* 声压 p 与介质振动的速度 $\dot{S}m$ 有以下关系

$$p = -2\pi\rho v^2 S_m = \rho v\dot{S}_m \tag{2.50}$$

与电路中的欧姆定律 V=RI 相类比，把声压 p 与电压 V 对应，$\dot{S}_m$（位移变化率）与电流（电量变化率）对应，则 ρv 与电阻 R 对应，所以把 ρv 称为声阻（或声阻抗）。

在各向同性的均匀介质中传播的波，根据惠更斯原理求出的波前的几何形状是不变的，即平面波还是平面波，球面波还是球面波，这是因为在各个方向上波的传播速度是不变的。在非均匀介质中，波的传播速度要改变，因此根据惠更斯原理得出的波前的几何形状就会发生变化，亦即波的传播方向会发生变化。这是符合实际情况的。

2）声波的衍射

波在传播过程中遇到障碍物时，传播方向要发生变化，发生绕过障碍物的衍射现象（Diffraction），也叫绕射现象。我们用惠更斯原理加以说明：

如图 2-23 所示，平面波的波前接近一个宽度 d 大于波长的缝时，把缝上的各点看作新的波源，从此发出球面形的次波，画出这些次波的包迹线。可以看出，在缝中间前方的波前还是平面，而在缝边处的波前已不是平面，缝两边的波前发生了弯曲，波线——即表示波的传播的方向的线改变了方向，说明波的传播方向改变了。一部分波，也就是一部分能量没有继续向前传播而向旁边传播。这就是衍射现象。

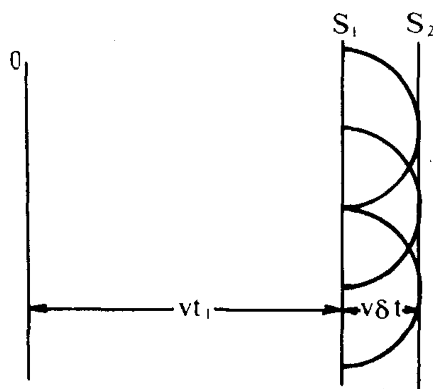


图 2-22　惠更斯原理—平面波

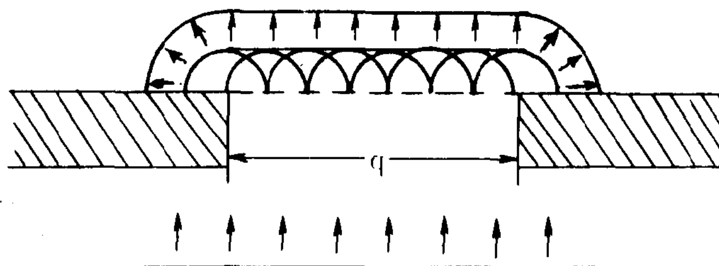
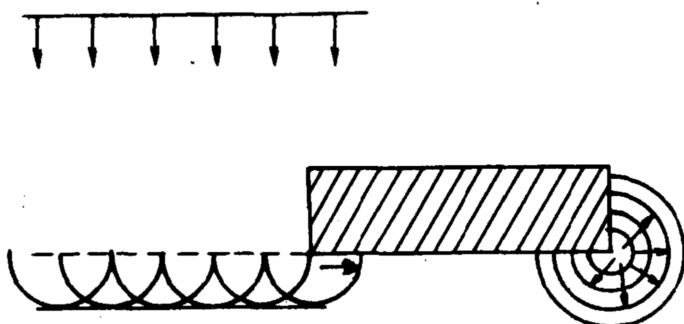
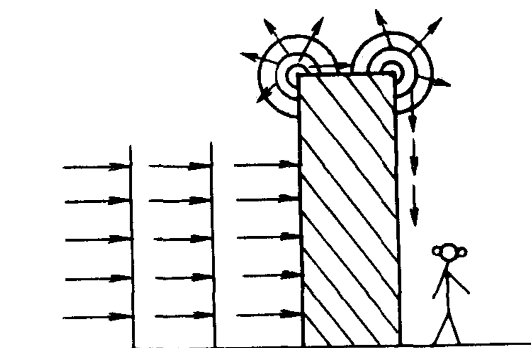


图 2-23　波的衍射

如图 2-24（a），把波所到达的每一点看作新的波源，由此发出球面形次波，用这可以解释波可以绕过障碍物传播，隔着高墙可以听到墙那边的人说话，即所谓“隔墙有耳”，是有科学根据的（图 2-24（b））。无线电波可以绕过山头、楼房传播等，都是这个道理。



(a)



(b)

图 2-24（a）（b）　波的衍射

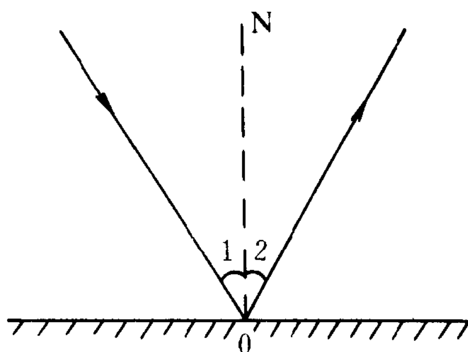


图 2-25　反射定律

从图 2.23 可以看出，缝宽 d 越大，则波的越多的部分继续向前传播不改变方向，亦即衍射的部分越小，衍射现象越不显著；反之，d 越小，衍射部分越大，衍射现象越显著。

当波长，λ>d 时，则缝处成了一个点波源，于是衍射现象就很显著。因此，对于同样大小的狭缝或障碍，波长越长，衍射现象就越显著。声波的波长约为几米，中波无线电波波长约为几百米，因此衍射现象显著；超声波及光波的波长很短，衍射现象就不显著。

要在特定条件下才能观察到衍射现象，因此超声波及光波可以聚焦形成定向发射的波束。

3）声波的反射

当波传播到两个介质的交界面时，会发生反射，其入射线与反射在反射面法线的两侧，而且入射线、反射线反射面的法线在同一个平面内，入射角等于反射角。这就是波的反射定律(Reflection)。如图 2-25，入射角为入射线与反射面法线之间的夹角∠1，反射角为反射线与反射面法线之间的夹角∠2，根据反射定律，有∠1=∠2 *）

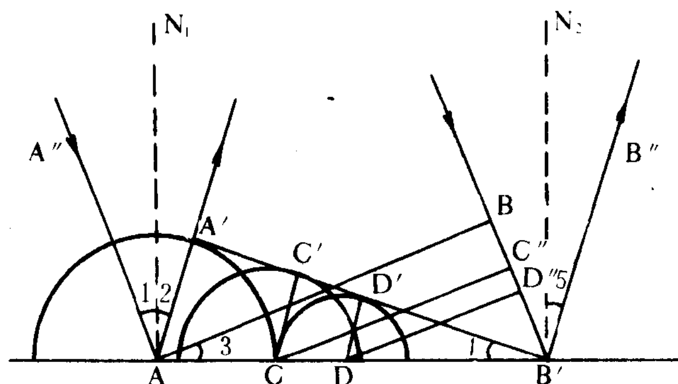


图 2-26　用惠更斯原理说明反射定律

在实际事物中，声波的反射常是要考虑的。在音乐厅、剧院、礼堂或试听室的设计中，要考虑从四壁、天花板甚至台阶等处的声的反射；不仅要考虑一次反射，还要考虑声波的多

---

* 现在用惠更斯原理来证明反射定律。

图 2-26 中，AB 是一入射的平面波在 t_1 时刻的波前。以 AB 为新的波源发出次波。当从 B 点发出的次波在时刻 t 到达 B′时，从 A 点发出的次波到达以 A 为圆心、$\overline{AA'}$为半径的球面。$\overline{C''C}$是入射波在 t_2 时刻的波前，当 C″发出的次波也在时刻 t 到达 B′时，从 C 点发出的次波到达以 C 为圆心，$\overline{CC'}$为半径的球面。同样，D″在时刻 t 到达 B′时，D 到达 D′……。因此，$\overline{A'B'}$是时刻 t 反射波的波前。图 2-26 中，$\overline{A''A}$、$\overline{BB'}$是入射线，$\overline{AA'}$、$\overline{B'B''}$是反射线，N1、N2 是反射面的法线。由此可见，入射线、反射线及反射面的法线在同一个平面内，而且入射线与反射线在法线的两侧。由于入射波与反射波在同一介质中，波速相等，因此$\overline{AA'}=\overline{BB'}$。这样，具有公共边$\overline{AB'}$的两直角三角形△AA′B′=△BB′A，所以∠3=∠4。由于$\overline{A''A}\perp\overline{AB}$、$N_1\perp\overline{AB'}$，∴∠1=∠3；$\overline{AB'}N_2$，$\overline{A'B'}\perp\overline{B'B''}$，∠4=∠5；又因∠2=∠5，有∠1=∠2，这就证明了入射角与反射角相等。

次反射。这与房间的大小，结构形式，长、宽、高比例和材料及表面的粗糙程度等都有关。如北京音乐厅台上高悬的挡板（图 2-27），两侧的侧棱等都有反射声波的作用。在小房间里唱歌，比较“拢音”或感到“浑厚”，也是声波多次反射的效果。

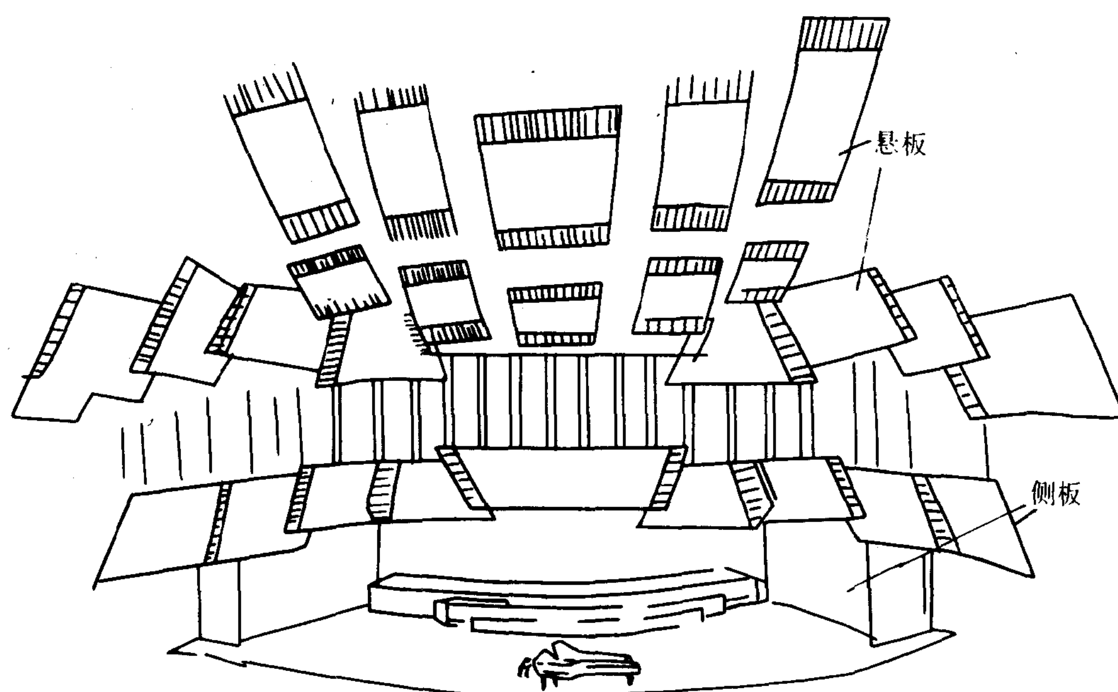


图 2-27　北京音乐厅的台

当声波的入射角大到一定程度时，会发生全反射。即全部能量都反射出去而没有吸收。因此，只要是一个足够大的圆形建筑的光滑内壁，都会有声的全反射效果，例如北京天坛的回音壁（图 2-28）。天坛的三音石（图 2-29）实际上可以听到不止两个回声，是利用声波的多次反射作用，而人的站位和坛内两个耳房等建筑结构又破坏了完全对称的格局。在相邻的两座楼房中间燃放爆竹，也会听到多次的反射声。

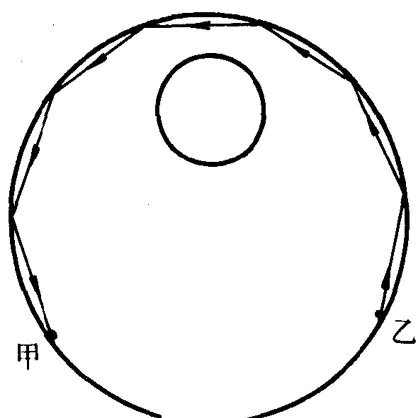


图 2-28　天坛回音壁

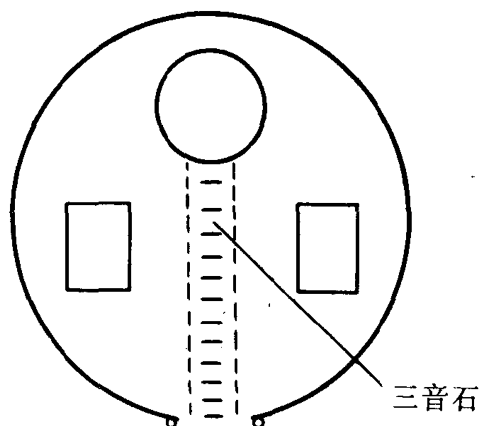


图 2-29　天坛三音石

意大利的西西里岛有一个著名的石窟，叫做杰尼西亚的耳朵，其出入口距底部有 30 多米

高差，在口上可以听到里面人的呼吸声。古希腊叙拉古暴君杰尼西亚把犯人放在里面，他在口上偷听他们的讲话。这也是正好是声源处的声音经过各处表面的反射比较集中于洞口的缘故。

4）波的折射（Refraction），声波的弯曲（Bend）

当波从一种介质传播到另一种介质时，由于两种介质内的波传播的速度不同，会发生折射，其入射线与折射线在折射面法线的两侧；而且入射线、折射线与折射面的法线在同一平面内；入射角、折射角以及波在介质里的传播速度有关系：$\frac{\sin i_1}{\sin i_2}=\frac{v_1}{v_2}$，其中 i_1 是入射角，即入射线与法线之间的夹角，i_2 是折射角，即折射线与法线之间的夹角，v_1 是入射波在介质 1 中的波速，v_2 是折射波在介质 2 中的波速，如图 2-30，这就是折射定律。（*

图 2-31 中，各时刻的入射波的波前为$\overline{AB}$、$\overline{CC''}$、$\overline{DD''}$……。在时刻 t，当从 B 点发出的次波到达 B′时，同时从 A 点发出的次波在介质 1 中到达 A′，在介质 2 中到达 A″；从 C″点发出的次波到达 B′时，从 C 点发出的次波分别在介质 1 和 2 中到达 C′及 C‴；从 D″点发出的次波到达 B′时，从 D 点发出的次波到达 D′及 D‴……。因此在时刻 t，反射波的波前为$\overline{A'B'}$，折射波波前为$\overline{A''B'}$，其中$\overline{AA'}=v_1t_1$，$\overline{AA''}=v_2t_1$，t_1 为波从 B 到达 B′的时间。从图中可见，入射线、反射线与折射面的法线在同一平面内，而且入射线与折射线在法线的两侧。

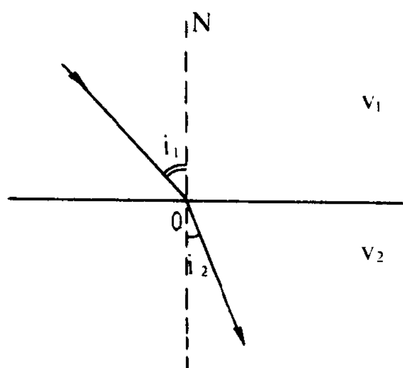


图 2-30　折射定律

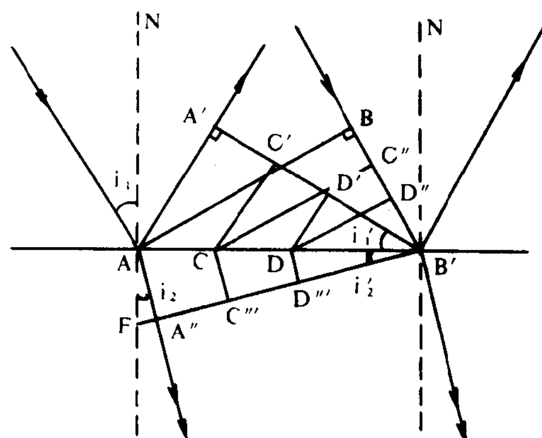


图 2-31　用惠更斯原理说明折射定律

前面已证$\angle i_1=\angle i_1'$；又因在直角三角形△AA″B′及△FA″A 中有$\angle i_2=\angle i_2'$，所以有

$$\overline{AA'}=\overline{AB'}\sin i_1'=\overline{AB'}\sin i_1=v_1t_1$$

$$\overline{AA''}=\overline{AB'}\sin i_2'=\overline{AB'}\sin i_2=v_2t_1$$

将上述两个式子相比，就有

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2}=\frac{v_1}{v_2}$$

这就证明了折射定律。

前面已讲过，只要是介质的密度、压强、温度或声阻不同，就应看作是两种介质，在其

* 我们用惠更斯原理来证明折射定律。一般情况下，波在传波中遇到不同介质的介面时，一部分反射，一部分折射，如图 2-31。

中传播的声速要发生变化，声波就会产生弯曲。两种介质并不一定要具有明显的分界面。

在炎热的夏日中午，如果晴朗无风，你会发现原野寂静无声，这是因为地面温度高，声波向上弯曲，甚至可以造成无声区，如图 2-32。正如印度的伟大诗人泰戈尔在《园丁集》中所描述过的情景那样，他写道："树林在正午的炎热里沉睡，大路寂无人影……我凝视天空，把我所熟悉的那个人的名字织在蔚兰色的苍穹里"。

同样，在清晨或晚间，你可以听到远处的火车声，机场的飞机轰鸣声。这是因为地面温度较低，声速较小，声音朝着速度小的方向弯曲，如图 2-33 所示。在刮风的天气，天空的呼呼风声好像格外响地传入你的耳朵，也部分是因为高空的风速大的缘故。你可以这样看：由于声音靠空气介质传播，介质本身有附加速度，也就增大了波的实际传播速度。

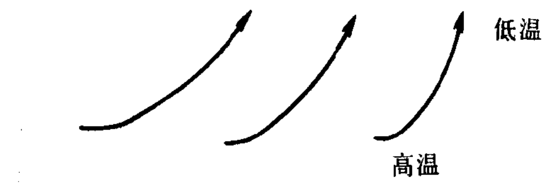


图 2-32　声波向低温弯曲

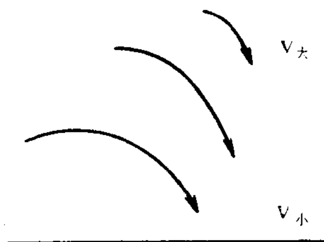


图 2-33　声波向速度小方向弯曲

5）声波的反射与透射成分

一般来说，总有一部分声波在两种介质的界面产生反射，而另一部分则透射进第二个介质。可以说明，两种介质的声阻 ρv 相差越大，声波的反射成分就越大（＊所谓两种介质的分界面，不一定是有形的。只要介质的密度或声阻发生变化，声波就会产生反射，朝前传递的声能就会有损失。*

至于透射部分被吸收多少，是与材料有关的。我们将在本书第十一章"室内音乐声"中讲述。

6）声波的独立传播

由两个波源发出的波，在空间汇合后，还继续沿着各自原来的方向传播，这就是波的独立传播定律。例如两个探照灯的光柱在天空中交叉汇合时加强，然后又各自沿原来的方向前进，好像没有经过汇合一样，如图 2-34 所示。

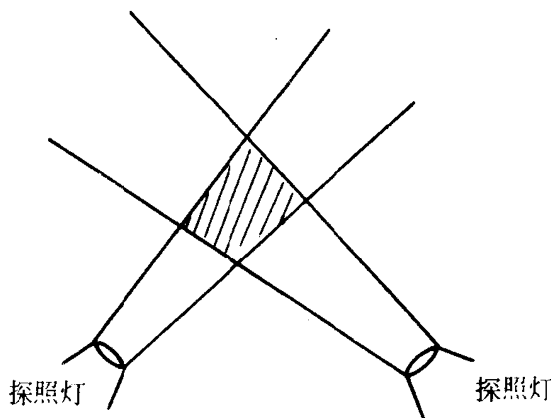


图 2-34　光的独立传播

两个波源的水波叠加时，会起一种粼粼

* 声波由介质 1 射入介质 2，反射成分（百分率）：

$$r = \left(\frac{\rho_2 v_2 \cos\theta_1 - \rho_1 v_1 \cos\theta_2}{\rho_2 v_2 \cos\theta_1 + \rho_1 v_1 \cos\theta_2}\right)^2$$

透射成分（百分率）：

$$t = \frac{4\rho_1 v_1 \rho_2 v_2 \cos\theta_1 \cos\theta_2}{(\rho_2 v_2 \cos\theta_1 + \rho_1 v_1 \cos\theta_2)^2}$$

式中 ρ_1、v_1、ρ_2、v_2 分别为两种介质的密度和其中的声速。θ_1 和 θ_2 分别为入射角和透射角。可见当两种介质相同时，$\rho_1=\rho_2$，$v_1=v_2$，$\theta_1=\theta_2$，$r=0$；v 相差越大，反射成分越大。

的纹理，而后也会沿着各自原来的方向前进。

管弦乐队演奏时，你可以分清台上各个不同位置来的不同的乐器的声音，虽然，各种乐器发出的声波在空间都已是交汇在一起的。这也是声波的独立传播原理。

在嘈杂的场合下能听得出某一个特定的人的声音或者某种特别的声音，也是靠声的独立传播性质。

用唱片或磁带纪录声音时，在一条声轨上可以同时记录不同的声音，然后重放出来，也是基于声的独立传播性质。

2.3.4 声学测量

声学的测量有客观的和主观的两大类：

1）声音的主观量

音高（音调）、响度和音色是一般认为的声音的三个主观量。音高与频率有关，但不完全一一对应。频率越高，则音高越高。音高的与声强也有关。响度与声强有关，也不一一对应。声强越强，响度越大。我们将第四章“听觉”中去进一步介绍。音色与频谱有关，但也不仅如此，音色还与动态等有关。

声学的主观量的测量，一种是用仪器通过对客观量的测定来测量，还有一种是通过人耳的测听来进行。这些我们将在第四章《听觉》及第十二章《音质的主观评价》这两章中论述。

2）频率的测量

对于单一频率的正弦波，可以用数字频率计测量，准确的可以测出 8-9 位数字。

转子式频率计可以用以测量乐音，可以测准到 1 音分（音分的含义请参考第三章）。

一般的计算机也可以加上专用的插件来测量声频。一般的乐音都不是正弦波，而是正弦波的叠加。

$$SPL = SPL_1 + 10\lg(1 + 10^{-\frac{SPL_1 - SPL_2}{10}})$$

对于非正弦波，通常由它的基频决定音高，正确的测出基频而不误测其谐波，可以用计算机的方法，可以用频谱的方法，也可以在一般仪器上反映出其强度最大的或有一定强度的最低的频率等。转子的音分仪可以在各个频率进行测量。

3）声级和声强和测量

声强的测量一般是通过声级计实现的。声级计是成品的仪器，显示一段时间内平均声级。

声级分为几种计权。各种计权是针对不同频段的声音对人耳作用有不同响度，作为对应或互补而规定的。关于这一点我们在“听觉”这章中再进一步说明。有的声级计还附有频谱

---

* 由于总压（有效声压）是各压的方和根即

$$P = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + \cdots + P_n^2}$$

所以 n 个相同声压级的声压 P 叠加为

$$P_n = \sqrt{n}\,P$$

$$SPLn = 20\lg\frac{\sqrt{n}\,P}{P_0} = 20\lg\frac{P}{P_0} + 10\lg n = SPL_1 + 10egn$$

$$SPL_2 = 20\lg\sqrt{\frac{P_2}{P_0}} = 20\lg\frac{P}{P_0} + 10\lg^2 = SPL_1 + 3dB。$$

显示。现时已发展了数字声级计。

4）分贝的相加

由于声压级或声强级等的单位是分贝，是一个对数的表示。所以两个50dB的声压级相加不是100dB而是53dB。普遍的有，两个不同声压级 SPL_1 和 SPL_2 叠加时：

下表列出两个不同声压级相加时，声压级的差与增量的关系：

SPL_1-SPL_2	0	0.2	0.4	0.6	0.8
0	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6
1	2.5	2.5	2.4	2.3	2.2
2	2.1	2.1	2.0	1.9	1.8
3	1.8	1.7	1.6	1.6	1.5
4	1.5	1.4	1.4	1.3	1.2
5	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0
6	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8
7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7
8	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4
10	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
11	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
12	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2
13	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
14	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
16	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
17	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
18	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
19	0.1	0.1	0	0	0
20	0				

由上可见，两个声级相差20dB以上时，小的声级就不起作用了。如果粗略地（dB值取在整数位）计算，两个声级差10dB以上，小的声级已经几乎没有影响了。如果有两个以上声级相加时，可以一一累计。对于声强级和功率级的叠加，上表同样有效。

5）声速的测量

空气中声速的测量的方法基本上是根据声速与频率及波长的关系即 $v=f\lambda$，由频率 f 及波长 λ 求声速 v。

常用的是驻波法。例如可以通过测听音叉振动在一端开口的水管口的反射声最强状况的变化，测出驻波的波长。因为从音源发出的声音在管口附近形成波腹。改变水位高度，听到

两次最强共鸣声之间的距离，即是半波长，如图（2-35（a））所示。又如通过测定闭管中空气振动的驻波波长（图 2-35（b）），或直接测定空间两个扬声器之间的驻波（图 2-35（C））等。

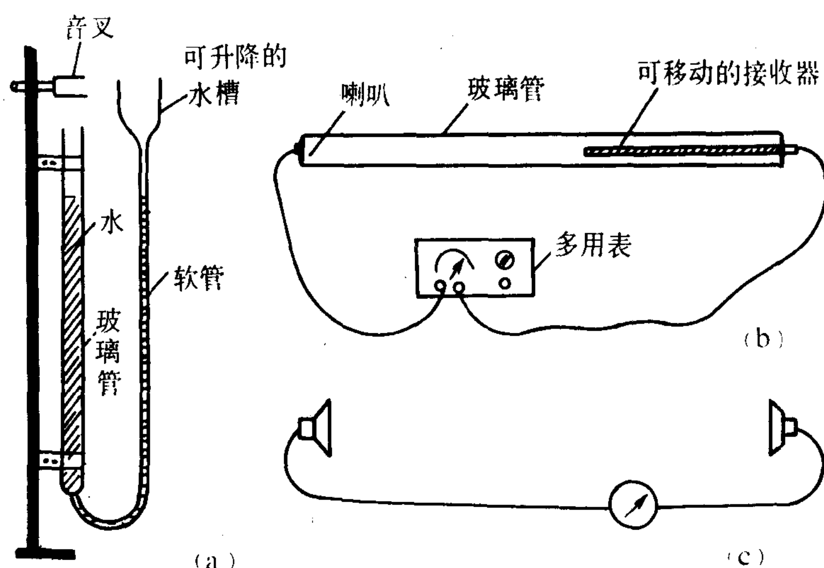


图 2-35　驻波法测声速

测定固体中的声速也常用驻波法，如弦的振动或孔脱法等。

也常利用测定物体的弹性模量 E 来测定声速。

公式（2.44）声阻的测量实际上就是声速的测量。

6）声谱的测量

声谱包括时间谱和频率谱，这是音乐声学测量中非常重要的一个内容。我们将在第六章中讲述。

7）其他声学测量

其他声学量还有混响时间、声的吸收系数、声的失真度、声的全息测量，声一电或声一力模拟测量等。有些我们放到以下各章节中去讲述，有些过于专、深，在本书中就不介绍了。

思考题：

1. 标准音高 a^1 的频率 440.00Hz，它的周期是多少？角频率是多少？

2. 某一架钢琴的最高音 c^5 的弦长是 5.2cm。如果还用这样粗细的弦的线，还保持同样大小的张力，那么这架钢琴的最低音 AO 的弦将有多长？

3. 试用公式（2.10）、（2.11）、（2.12）来说明乐器本身及其共鸣箱的大小与发音高低的关系。

4. 一根钢丝以频率 f＝60Hz 振动。设钢丝两端的固定点之间的距离是 100cm，可认为不变。钢丝的杨氏模量 $E=2.00\times10^{11}N/m^2$，不随温度变化。已知钢丝的线膨胀系数为 $12\times10^{-6}℃^{-1}$，问当温度增加 10℃后，其频率改变了多少？（6.4Hz）

5. 两根完全相同的琴弦，其频率都是 400Hz，若将其中一弦的张力逐渐增加，问增加百分之几，这两根弦可以产生每秒 4 拍的拍频？（2%）

6. 两根相同的弦，长均为 1.00m，并发出同一频率的声音。如果把其中一根振动部分的

长度缩短0.5cm，维持张力不变，则两弦同时发声时产生每秒2次的拍频，求弦线原来的频率？(398Hz)

7. 试举例说明阻尼振动在音乐声学中的应用。

8、试举例说明共振现象在音乐声学中的应用。

9、已知空气中声音传播的速度约为340m/s，问频率 $f=440.00Hz$ 的波的波长 λ 为多少？又，$f=27.5Hz$ 时，$\lambda=$？$f=4186Hz$ 时，$\lambda=$？

10、用式(2.45)计算在标准大气压下干燥空气中传播的声速。干燥空气的密度 $\rho=1.293\times10^{-3}g/cm^3$。(331.2m/s)

11. 用式(2.44)计算在钢材中传播的声速。已知钢的杨氏模量 $E=2\times10^{11}N/m^2$，密度 $\rho=7.8\times10^3kg/m^3$。(5064m/s)

12. 证明：如果声音在空气中的传播是绝热的，则声的传播速度与压强无关。

13. 当迎面而来的汽车鸣笛声从 c^1 变成 d^1，即频率升高为 $2^{\frac{1}{6}}$ 倍，设空气中的声速为340m/s，求车与听者的相对速度。

14. 气温-17℃下，一辆以72公里/小时的速度行驶的汽车鸣笛2.0秒。站车铁轨上的人(a)有的看到机车迎面而来，(b)有的看到机车背离而去，问他们听到的声音分别比鸣笛时间延长或缩短了多少？(a. 减少1/8秒。b. 延长1/8秒)

15. 一般人耳闻最小声压幅值为 $2\times10Pa$。问：

a. 对在空气中传播的 $f=1000Hz$ 的声波，耳膜所感觉到的最大振动位移是多少？

b. 此时耳膜的最大振动速度是多少？

c. 对于 $f=1000Hz$ 的声波，压强幅值为 10^3Pa 时就会引起痛感，这时耳膜的振幅是多少？(a. $7\times10^{-10}cm$，b. $5\times10^{-6}cm/s$，c. $4\times10^{-3}cm$)

16. 在大厅内某处接收到舞台上一把小提琴演奏的声压级是70dB，如果想得到100dB的声压级，台上至少要有多少把小提琴同时演奏？(1000)

17. 如果一个人高声歌唱的声的功率级为80dB，至少要多少人同时放声高唱才能点亮一个40W的电灯泡？(40万人)

18、把以下列出的声源功率换成功率级，以 $10^{-12}W$ 为0dB，并把声功率与功率级对照标出。

a. 微语～$10^{-8}W$，　　b. 低声交谈～$10^{-5}W$，

c. 高声歌唱～$10^{-4}W$，　d. 大卡车的发动机～$10^{-1}W$，

e. 螺旋浆飞机发动机～10^2W，

f. 喷气发动机～10^3W。

参考资料：

1. 福里斯、季莫连娃：《普通物理学》第一卷，梁宝洪译，高等教育出版社，1952年版。

2. 龚镇雄：《振动与波讲义》，北京大学物理系，1970年版。

3. 北京大学物理系，中国科技大学物理教研室：《物理学习题集》第一册，高等教育出版社，1980年版。

4. 卡约里：《物理学史》，戴念祖译，内蒙古人民出版社，1981年版。

第三章　音乐声学的生理、心理基础——听觉

§3.1　听觉与声学

3.1.1　没有听觉就没有声学

声学讨论声的产生、传播和接收，声的性质以及声音与其它物质的作用。而声的接收，不管是先通过或不通过拾音器，也不管是通过什么方式，最终是被人听到。所以离开了人耳的听觉就谈不上声学。对于一个失聪的人，世界是寂静无声的。

3.1.2　声学表现为主观与客观的矛盾和统一

从物理学上看，乐音和噪声有各自的定义，但是从音乐上或是从心理感受上看，喇叭里播放的响度很大的音乐会吵得人心烦意乱，120分贝以上的硬摇滚乐有人喜欢，有人则嫌它太嘈杂。轻柔的背景声，如树叶的沙沙声，海浪的轻轻拍岸声，哪怕不是乐音，也会使人愉快。有时还需要一些现场的噪声，如节目演出的鼓掌声，篮球场上的扣球声，才显得有生活气息，有真实感。

声音太纯了不一定好听。自始至终都是一种节奏或都是完全协和的和弦，也会乏味。现代音乐有有调性和无调性音乐，旋律性强的和旋律不明显的音乐等。不管是哪一种音乐，哪一首乐曲中，不论是音高、旋律、节奏、强弱、快慢、音色等，都在变化和对比中发展。

人的听感（Sensation of Hearing）还与心理因素有关。当你情绪不好的时候，一些响动甚至动听的音乐都令你心烦；相反，当你情绪好的时候，周围的一切都会让你感到美好。

作为自然科学，最终的判断是客观标准。作为艺术，最终的判断是主观标准。作为声学，就兼有主客观的内容。特别是音乐声学，主观成分就更多一些。目前声学中的技术水平还无法完全达到各种人听觉的全部要求。对于音响设备，除了客观检验以外，最终还要由主观听觉评价来决定优劣。即使到将来，技术标准也不能完全取代听觉判断。生理解剖上，目前也尚无法弄清全部听觉的机理，如音头、音尾的波形与听觉的关系等。而且，音乐声学还涉及许多心理因素。

对客观世界研究的精细程度，也要与主观听觉灵敏度结合，如人耳对音高差、声强差的分辨能力，建立音高所需的时间，人耳的延时效应等，这些因素与技术指标的制定，声音的加工等都有关。把主观与客观结合起来是发展音乐声学的途径。

3.1.3　声音的主观量

在第二章中我们已经讲过，按传统的说法，音高、响度和音色是声音的三个主观量，它们都对应有客观的物理量：音高依赖于频率，响度依赖于声强，而音色则依赖于频谱和动态等。然而它们之间的关系又不是一一对应的。

声音的主观量也有自己的单位、定义。但实际应用中有些单位还不普及，往往用客观量的单位来表示。

有些声学计量仪器的使用，已经把主观的因素考虑进去了，如声级计的各种计权方式。

声音 的时间效应方面，还应该有一个主观量来表示。特别是在短时值的情况下，听到的声音时值与客观存在的声波时值之间是有区别的。

§3.2 听觉的生理

2.2.1 耳的结构和工作途径

如图 3-1 所示，耳分外耳、中耳、内耳。内耳通过神经连通大脑。外耳有耳壳 a、听道 b 和鼓膜 c。中耳是一约 $2cm^3$ 的空腔，有尤氏管 d 通鼻腔和口腔，有三个听小骨：槌骨 e、砧骨 f 和磴骨 g。这些是个拾音器和机械放大器。内耳入口处为卵圆窗 j。内耳有三个管身体平衡的半规管 h 和耳蜗 i，有一个基底膜把耳蜗分成两半，在蜗顶相连，内耳蜗充满淋巴液。声波传到鼓膜，通过磴骨、卵圆窗，使耳蜗内淋巴液振动，从而使基底膜振动。基底膜上有毛细胞，通过外毛细胞放大基底膜的振动，传到内毛细胞，内毛细胞上神经末稍 k 受到刺激，产生神经脉冲传到大脑。

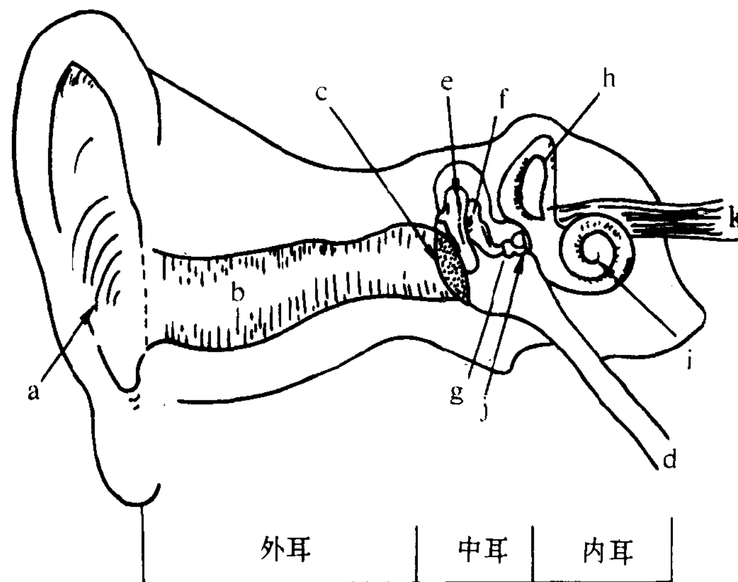


图 3-1 耳的构造

在耳及神经通道中对声音信号进行编码，反映声音中的各种信息，如响度、频率、持续时间等。肯定地说，这种编码是一种高级编码，是目前最高级的计算机也未能实现的，也是人们远未能掌握的。

3.2.2 耳的功能

耳是一个传声器，可以接受有 10^7 数量级的声强动态范围。对于外界的不同强度的声音，可以自动调节，自动保护。世界上还没有一个仪器可以有这么大的动态范围和这样优异的自动控制功能。

耳是一个频率计，可以测出不同的频率。

耳也是一个频率分析器，可以从几个声源中分辨出多种或单个音。耳朵比眼睛高明。在一个时间里，对于一个对象，眼睛只能看到一种颜色。

古典的理论是，耳朵对声波的相位不起反应，这叫做听觉的欧姆定律。现今的理论和实践表明，声波的相位对听觉是起作用的，立体声就是其中之一例。

3.2.3 耳的听觉范围

图 3-2 给出人耳的听觉范围。横轴是频率，纵轴是声压级。人耳只有在一定的频率和声强范围内才能听得见。图中最小的一块区域是一般说话和歌唱的范围，稍大的一圈是音乐范围，最大的一个区域是全部可听声域。从图中也可看到，在 1kHz～5kHz 附近，耳朵可以听到最弱的声音。

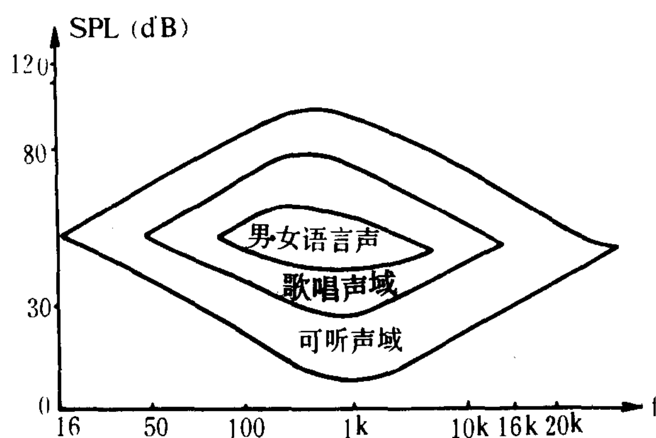


图 3-2 耳的听觉范围

§3.3 人耳对声音强弱的感觉

3.3.1 可感声强范围

在图 3-2 中，已经给出了不同频率的可感声强范围。极微弱的声音是听不到的。以频率为 1kHz 为中心，向低频段和高频段延伸时，可感声强的区域也越来越窄。一直到低于 16Hz 及高于 20kHz 时，就听不到了。在 3kHz～5kHz 间，人耳有一个最灵敏的区域。

可感声强的范围因人而异，各人耳朵的听力不同。随着年龄的增大，人耳对声强的感知阈值也会提高，即年纪大的人耳朵“背”。

对于一般人来说，人耳可听声音的强弱范围在频率为 1kHz 下约为 10^{-5}Pa 至 10^{2}Pa，声压级（SPL）是 0dB 至 140dB，与信号频率有关，与信号时值长短有关。

3.3.2 可感声强变化

人耳的可感声强变化与频率及频率成分有关，也与声音强弱程度有关。一般来说，低频

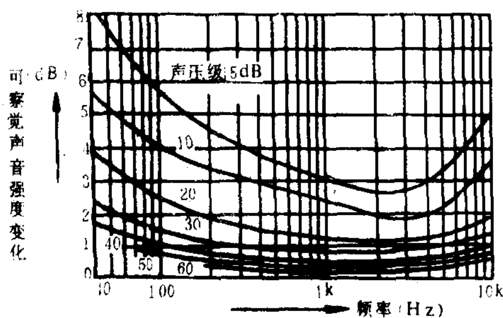


图 3-3 人耳对纯音强度变化的分辨限

信号与高频信号都难以察觉，多频谱的声音比单音难以察觉。弱信号的变化比强信号的变化难以察觉。图3-3，为人耳对纯音强度变化的分辨限。

人耳的可感声强变化还与音色、不同测试对象有关。

3.3.3 声强听感的频率响应

对同样强度的声音，不同频率的主观感觉是不同的。图 3-4 是相对于 1kHz 时的听觉强度曲线。声压级（SPL）越高，曲线越平直。亦即是对于低强度的声音，低频效果不佳。对高于 20kHz、低于 16Hz 的声音，都听不到了。而在 3kHz－5kHz 之间听觉最敏感。

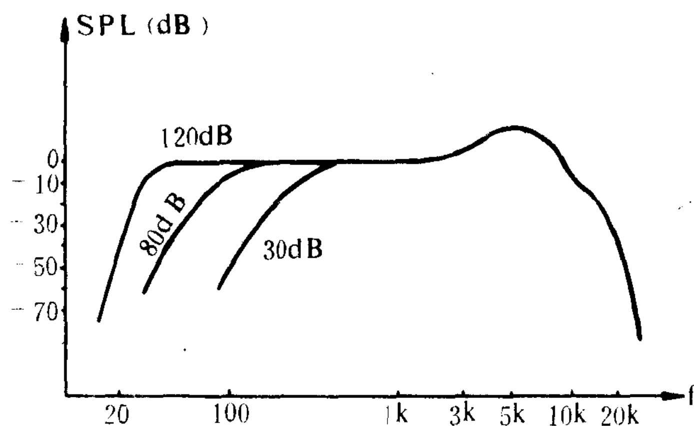


图 3-4 相对于 1kHz 的听觉强度

3.3.4 响度、响度级、等响曲线

响度（Loudness）是声强的主观量。

以 1kHz 时的声压级定为响度级（Loudness Level），单位是“方”。(Phong)

40 方产生的响度为 1“宋”(Sone)。每增加 10 方，响度加倍。即 50 方产生的响度为 2 宋，60 方产生的响度为 4 宋。这样来定义响度的单位是根据人耳的听觉特性：即刺激量（声强）增加为指数方式，感觉量增加为差数方式。这是对耳膜的自动保护。

图 3-5 是等响曲线 (Equal Loudness Curves)，不同频率下对不同声压所听到的响度相同。有响度级计，把人的听觉效果因素加入进去了。实际应用上，要考虑反映演播室内的固有噪声、电声设备的固有噪声等微弱信号在听感上的影响。电声设备在低声能下重放时会感到低音比高音不足，因此，如果没有高级的音响设备，最好把放音量调到与实际录音时差不多。

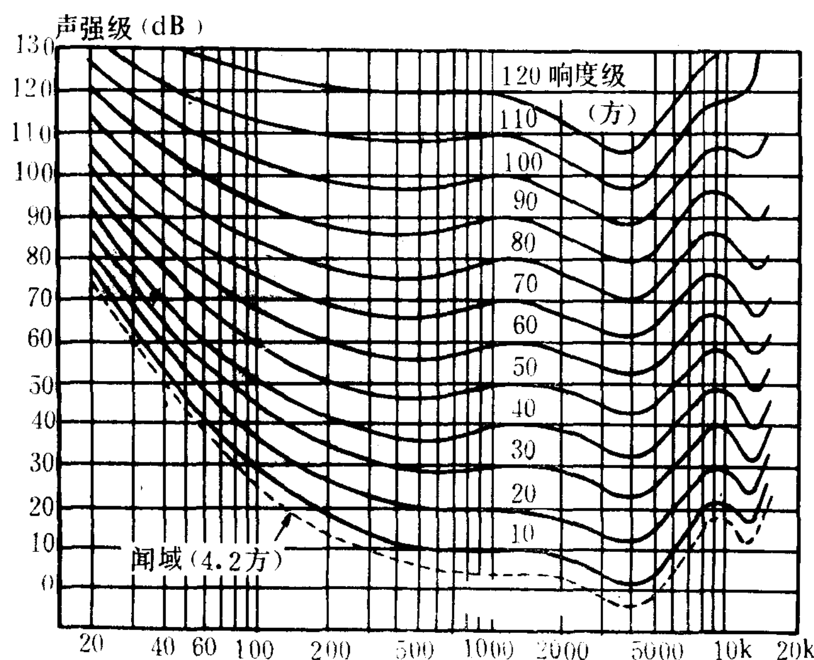


图 3-5　等响曲线

§3.4　人耳对声音高低的感觉

3.4.1　音高（Pitch）与频率

音高（音调）也是一个声音的主观量。

人耳对声音高低的感觉主要与频率有关。频率高，感到音细、高；频率低，感到音粗、低。音高与频率有正相关的关系，但没有严格的比例关系，且因人而异。

音高的单位是“美”（Mel）。频率为 1000Hz 的纯音、音高在听阈上 40dB 为 1000 美。

图 3-6 是钢琴的调律曲线，说明在钢琴上如果按十二平均律定音高，实际调律时在低音区要下调，高音区要上调，最大会差几十音分之多。这样，听起来才有正确的音阶听感，要不然，如果完全按八度同音音程定弦，钢琴的低音键听起来就偏高，高音键听起来就偏低。

3.4.2　音高与响度

音高的听感与声音的强弱也有关。图 3-7 表示纯音从 40 方增加到图上所示响度级时，听感音调下降的百分率。这主要在频率小于 1000Hz 时存在，频率超过 1000Hz 已影响不大。在 200Hz 左右有一个低峰值。

3.4.3　音高差分辨

人耳可以分辨的音高差，与声音的频率、音色、强度以及不同测试对象、测量环境条件都有关。图 3-8 表示不同声压下，不同频段对音高分辨的能力。声压越小，低音区分得越清楚。

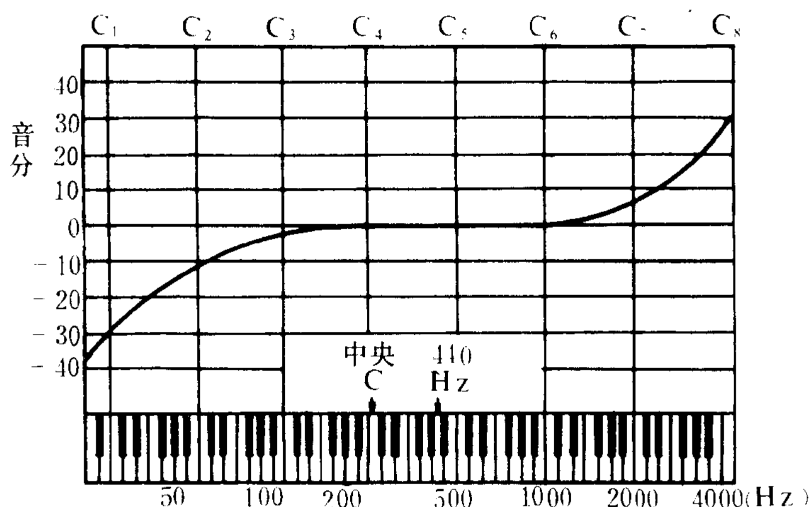
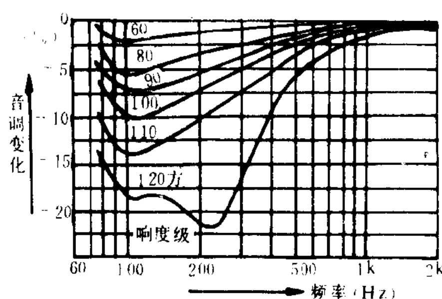


图 3-6 钢琴调律曲线



图中纵坐标表示的是一个纯音从40方响度级增加到图中所标的响度级时，所感音调下降的百分数

图 3-7 纯音强度增加，听感下降示意图

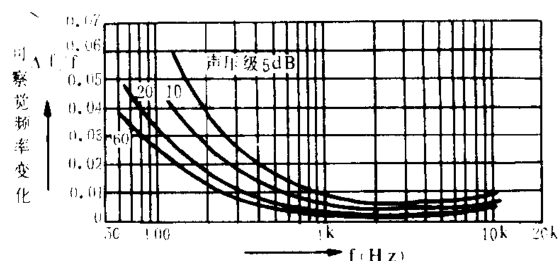


图 3-8 人耳对纯音频率相对变化的分辨限

下面列出用标准音作为参考音与有一个待测音作为比较的条件下，不同音色、不同测试对象、不同频率的音的音高差分辨。这里采纳了试样随机排列，加入零因子，以零因子的错判率作为有差别音的准判率的起点，以 2/3 的人可分辨为上限，得出的显著不可分辨限和显著可分辨限的实验结果。(*

测听类型	显著 不可分辨限（音分）	显著 可分辨限（音分）
男大学生（194 人）	2	8
女大学生（56 人）	2	9
大学生（250 人）	2	8
专业音乐工作者（50 人）	2	6
纯音（110，220，440，880，1760Hz）	2	7

续表

测听类型	显著 不可分辨限（音分）	显著 可分辨限（音分）
弦乐距音色（110，220，440，880Hz）	2	6
管乐器音色（220，440，880，1760Hz）	4	16
大学生和音乐爱好者，听音条件差	2	7
一般大学生，听音条件较好	1	5
一般大学生，听音条件差	3	7
110Hz，各种音色	5	9
220Hz，各种音色	3	8
440Hz，各种音色	2	7
880Hz，各种音色	1	6
1760Hz，各种音色	2	6
纯音 110Hz	6	29
纯音 220Hz	5	10
纯音 440Hz	3	8
纯音 880Hz	1	4
纯音 1760Hz	2	6

3.4.4 音高建立时间

如果一个音的时值太短，是建立不起音高的感觉的，只能听到“嚓”的一声。显然，如果一个音的持续时间不到一个振动周期，是不会有音高的听感的。比如一个 100Hz 的音，周期是 10ms，则小于 10ms 的时间内还不足以获得一个完整的振动，当然不能有音高感，实验证实了这一情况，至少有 1.4 个周期才能有音高感。（*

那么，一个乐音的时值长于 1.4 个周期时是不是就能听出音高呢？实验结果表明，纯音的时值小于 3ms 时，也不足以听到有音高感。

不足一个周期就没有一定的频率。*

§ 3.5 人耳对音色的感觉

音色（Timbre）也是一个主观感觉量，因人而异。

音色不仅决定于频谱，还与音的起始和结束情况，即音头音尾有关。如果掐去音头，小提琴与长笛的音色就不好区分。

听觉会对声音进行加工，有非线性特性。A 声加 B 声会出现另一种声音。

音色还与音高、声强有关。

---

* 北京大学物理系和电子部电声电视研究所的实验。

音的时间反演是不能重复的。例如，一段钢琴的录音带，反过来放，虽然频谱肯定一样，但音色不同。

§ 3.6　听觉的掩蔽效应

3.6.1　声的掩蔽

一个音会影响对另一个音的听觉能力。以由于掩蔽声的存在，被掩蔽声的闻阈必须提高的分贝数，来表示掩蔽的强弱。

听觉的掩蔽效应（Masking Effect）与两个声的声强级、频率、相对方向、延续时间有关。

单一频率的掩蔽声效应如图 3-9、3-10 所示。

图 3-9 是 220Hz 纯音的掩蔽声在不同声压下的掩蔽。当声压级为 99dB 时，对 1kHz 的声需要在闻阈（0dB）上加 65dB 才能听到。图 3-10 是 1kHz 纯音的掩蔽声。

噪声的掩蔽效应更为强些。

3.6.2　声掩蔽效应的应用

利用声音的掩蔽效应可以用有用声信号去掩蔽无用声信号，即把不需要的声音降低到一定程度就可以了。有许多指标是反映这种性能的，例如对不同声强的声音，静噪可以有不同要求。

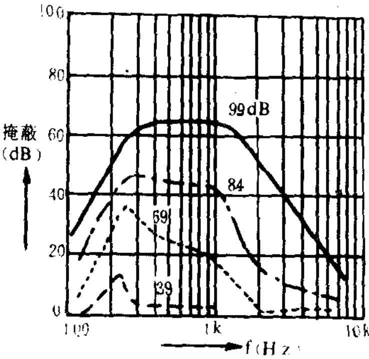


图 3-9　声的掩蔽（220Hz 纯音）

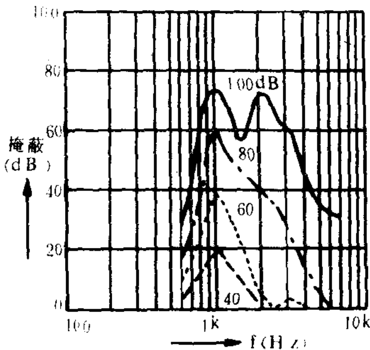


图 3-10　声的掩蔽（1kHz 纯音）

利用“鸡尾酒会效应”可以在嘈杂的声音中找出需要的声音。

“声障”将是演出时要考虑的一个实际问题。

“杜比降噪”也是利用了听觉掩蔽效应。

§ 3.7　听觉的时间效应、哈斯效应和听觉驻留

哈斯效应（Haas　Effect）是指两个音的同时发声，如果起始的时间差小于一定时值，就分不清有两个音。对不同方向来的间，间隔约小于 17ms 时，分不清是两个音；对同方向来的两个音小于 30ms 就分不清了。一般要大于 50ms 才能把两个音分开。这反映一种听觉的延时

效应。

听觉驻留是指听觉有个保留时间，有个起始和衰变过程。包括到底听觉有没有像视觉那样的有一定暂留时间？如果有，时间多长？暂留与声的波形有没有关系？怎样定义“听觉暂留时间”？听觉的暂留有没有实际的应用意义等等。迄今为止，用不同方案进行的实验有不同的结论。

听觉的时间效应还与强度有关。同一强度的脉冲声，时间延长，听起来响了。

§3.8 双耳效应 (Binaural Effect)

3.8.1 双耳定位 (Binaural Localization)

人对声源方向的判断是一个物理、心理、视觉、听觉的综合效果。如图 3-11，从声源 s 发出的声，到达两耳有强度差和时间差。若距离很远时，以时间差为主。时间差：

$$\triangle t \approx \frac{h \sin \theta_s}{v} \tag{3.1}$$

公式 (3.1) 中 v 是声速，h 是双耳间的距离。声源距左、右耳的距离。r_L 和 $r_R >> h$。

双耳的定位效应是立体声 (Stereo) 技术的生理、物理基础。

3.8.2 声像 (Sound Image)

如果人为的在人双耳中产生一个声音的时间差或强度差，就好象有一个空间点在发声，这个点叫声像。用左右两个扬声器 L 和 R 输出信号，如图 3-12。

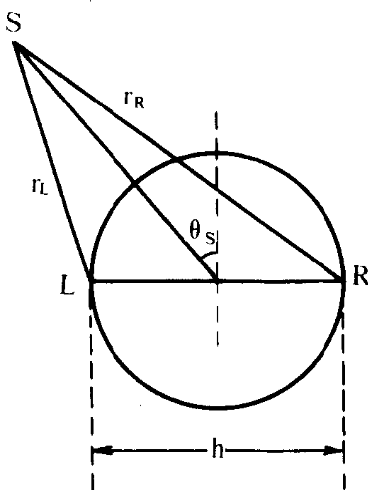


图 3-11 声从声源到两耳的时间值及强度差

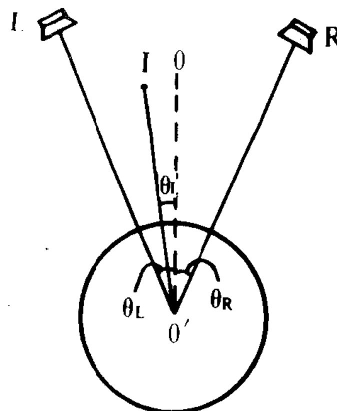


图 3-12 声像

实践中可以用强度差，或可以用时间差，也可以两者兼用。实用上强度差用得多。图中 I 为声像，θ_L 和 θ_L 分别为左、右扬声器与声像间的夹角，θ_I 为声像与中线 oo′ 之间的夹角。利用 L 与 R 的强度不同，可以改变 θ_L 和 L_R 即改变 θ_I，亦即使声像处于不同的位置。这可以用立体声正弦定律来表示，我们将在第九章“音乐电声”中予以进一步阐述。

§ 3.9　音乐声的听觉实验方法

3.9.1　传统的心理物理实验方法

听觉实验是心理声学实验的一个内容，常常使用心理物理实验方法。传统的实验方法之一是把待测量由大到小，再由小到大，或由强到弱再由弱到强通过阈值，由人去判断阈值的所在。这是一种极限法，或叫最小变化法，也叫系列探查法。这种方法直观、简单，但常常会有主观期望倾向或习惯性误差，因为许多人往往总希望自己的判断力比较强。

第二类传统的心理物理实验方法叫恒定刺激法，即在阈值上下固定几个刺激量，随机排列，找各刺激量被觉察的次数多少来判定阈值，因此也叫次数法。这种随机安排可以减小期望性误差，但与被测试者的态度有很大关系，许多人往往过于自信或过于自谦而增加或减少了判断与标准刺激相同的次数。

第三类方法叫做调整法，即容许被测试者去调整比较刺激，以与标准刺激相等，然后以多次测量的标准偏差作为差别阈值，所以也叫平均误差法。但这方法安排比较麻烦，而且结果受操作者的动作技巧影响较大，还不能测量可能连续变化的量。

这些方法还可以有更新或发展，包括把连续的变成阶梯式的，或采取不同的分组或数据处理方法等。

所有这些方法中，除了实验的指导思想以外，还有一些其他问题：一是判断标准问题，如上述往往都以 50％为阈值，能不能有其他物理模型？或定义最大最小两个阈值？二是采样数目问题，理论上当然采样数越多越好，但从经济角度考虑，有多少就可以了？三是数据处理方法问题，四是心理因素影响问题，五是测量条件或待测者的一些随机状态的影响问题等。

3.9.2　心理物理学实验方法的新探索 *

如果在传统的心理物理学实验方法的基础上，吸取各种方法的优点，尽量避免一些缺点，把物理实验方法用到音乐声学的心理实验上，建立一种新的物理模式，减少主观心理因素和条件因素的影响，我们实验的做法是：

1）有意安排“零因子”。在判定分辨限的实验中，随机安排了一定数量的待测量与标准量相同的“零因子”。根据对零因子的准判率，作为每个测试者（或测试条件）的判据的权重，这样可减少心理因素的影响，也减少了每个测试者临场状态的影响。在“人耳对音高差分辨”* 及“人耳对声强差分辨”* 实验研究中都安排了“零音分”及“零分贝”。

2）把物理模式取为：不一定以 50％为判据，而是以零因子的确判率为起点，作为显著不可分辨限，以 2/3 准判或其它任取的一个数据特性比来定义显著可分辨限，从而建立了根据不同情况、带有几个待定系数的经验公式。在“人耳对音高差分辨”实验研究中就采取了这种模式。

3）在同时间内随机的安排一小段或部分重复试听，以每个测听者对这段重复测听的结果的一致程度来确定这个测听者的权重。这样可以避免个人临场状态的不稳定的影响，并给

---

* 均为北京大学物理系音乐声学与计算机音乐研究室或与外单位协作的实验。

予各种不同水平的测听者以合理权重，这在“音高建立时间实验研究*）及“扬声器及电子乐器音质主观评介评分“方法”（*中应用。

4）尽量以最容易判准的方案来减少主观判断模拟的影响。如在“音高建立时间”的实验中，用人们最易接受和判断的八度音程来判断。

5）不同条件的每组群体取30个左右，已可以作出判断。（*

6）用计算机处理数据，可以方便的改变物理模式和处理方法，也提供进行单个人处理的条件。（*

7）为进一步作心理因素影响试验提供条件。

思考题：

1. 人耳对音的高低、强弱的感觉和分辨与什么因素有关？

2. 听觉掩蔽、听觉延时、听觉驻留在实际生活、工作中有何意义？

3. 立体声的基本依据是什么？

参考资料：

1. 马大猷，“环境声学”，

2. 管善群，“电声技术基础”。

3. John Askill，“Physics of Musical Sounds”

4. 龚镇雄等，The Resolving Power of Human Ear to Pitch Difference，Acoustica Supplement to No. 4，Vol076 P. 80，1992。

5. 龚镇雄等，Zero Factor Method-A New Threshold Audiometry，Proceedings of International Symposium on Musical Acoustics，P. 115-118，Tokyo，1992。

6. 龚镇雄等，Pitch Establishing Time，Proceedings of SMAC-93，P. ，Stockholm，1993。

第四章　音乐声学的音乐基础——音乐的构成

在本章里，我们要介绍一些有关音乐的基本知识。实际上，对于有一定音乐基础的人们来说，这只是一个简单的复习。然而这里我们叙述的方法，则是从音乐声的构成出发去进行，即试图从音乐声学的角度，去建立关于音乐的体系，从逻辑的规律和音乐声诸要素的联系上来说明音乐的有关内容。

当然，这并不能替代音乐艺术和科学内容的本身。

§4.1　音乐声的要素和音乐的构成

4.1.1　乐音的要素，音乐声

乐音的主观感受，通常讲有音高、响度和音色（或音品、音质）三个方面，我们把它们称为乐音的三个要素。与之对应的客观量，大体上，音高对应于频率，响度对应于声强，而音色则是除了频谱外，还与动态等有关。在以下的叙述中，我们有时会混杂地使用主观量和客观量，以适应于人们的习惯。

在第一章中，我们已经阐明过，音乐声所包括的除了乐音之外，还有在音乐中所用到的、在物理学上看来为一些属于噪声的声响等。因此，我们在提到音乐声时，有时就不一定包括乐音的全部内涵（如音高）了。

4.1.2　音乐声的组合和运动

从音乐声学的角度上来说，音乐是音乐声的组合的运动。音乐声的组合有静止的组合和在运动中的组合，有相同音色和不同音色的组合，有不同音高和不同强度的组合，有近关系的和远关系的组合等等。

音乐声的运动有音高的运动、声强的运动和音色的运动，或兼有两者或三者的运动，即音的高低、强弱和音色随时间的变化。因此，对于音乐声来说，需要加上时值（时间）这第四个要素。实际上，音高、响度（常用声强或音强）、和音色这三个要素本身也已包含了时间的因素。因为，没有一定的时间，就不能建立音高，试想，如果连一个振动周期的时间也不到的话，就无所谓有什么频率和音高了；而不同音色的音也是由不同的简谐波叠加而成的，也是需要一定的时间才能体现出来的；还有，太短促的声音，也是很难说上有强弱和音色之分的。

以上所指的音乐，还仅仅是纸面上的或者是机械的、呆板的音乐，所谓“照谱宣科”，没有或少有感情的渗透。我们知道，不同的人演唱、演奏或者指挥同一个乐曲，会有不同的处理，表达不同的情感，得到不同的效果。所以，作为一个完整的音乐表现，还有一个感情的要素，这是通过演奏或表演来实现的。这里还不包括听者。

下面，我们先从音乐声的音高、响度、音色和时值（音长）、这四个要素来讨论音乐。

4.1.3 音乐的构成

由音乐声或由其构成的音乐的基本要素，可以构成音乐的全部内容。我们先把演奏（感情）这个要素暂放一下，看看由音高、音强、音色和时值这四个要素的构成音乐。

先谈音高本身。音程就是音高差，或用频率比表示（参看第五章)。音阶是一系列音按音高顺序的排列。和声是两个或两个以上不同音高的音的叠合，而和弦是三个或三个以上的音按三度关系的叠合。和弦外音是音高不在和弦结构内的音。音律学是研究在一个八度音阶内确定各个音音高的方法和各音间的音高关系。和声或和弦的协和与否也是由音高关系决定的。

调式原是讲一个八度音程内的音高关系，但是它又有一定的扩展。因为调式是针对一首乐曲或至少一段音乐的，因此除了音高本身的因素以外，已经含有时间的因素，只是不明显地表示出来而已。

音高与时间的关系上，组成以下内容：如旋律，包括动机、乐节、乐句、乐段以至整个曲调都是音高随时间的运动。旋律音型、颤音、曲式，简单的单音色的演奏、演唱，发单音的计算机音乐的旋律等，也无非是音高随时间的变化。对位法、和弦的连接则是多重的音高随时间的变化。

音强与时间的关系构成拍子、节奏、节奏型。

频率（反映音高）与音强则组成频谱。

更多的情况是几种要素的同时作用。如合唱、合奏、有伴奏的演唱等则是音色、音强、旋律都随时间变化的结果。配器、作曲也是这几个要素的组合。

风格则更是一种综合构成，还要加上演奏和感情的色彩。从音乐声学上讲，不同的音乐风格就是体现音乐中某一个或某几个要素或要素组合特点的某种音乐构成。

以上仅从音乐声学的角度说明了全部音乐的内容，这还可以进一步指导我们去研究新的课题。例如研究音色与音高的关系，音色与音强的关系，音色与时值的关系等。而这些问题已经在实践中提出来了。例如，把钢琴的录音带倒过时间顺序来播放，会出好似手风琴的音色，虽然它们的频谱没有不同；掐去音头的小提琴声与长笛的声音很难分辩等。看目前的记谱法，很难把这些音乐信息全部记录下来。因此，记谱法出也是值得研究改进的一个课题。

4.1.4 音乐的构成图解

以上的讨论，我们可以用一个简单的座标图来表示，见图 4-1。以 f 代表音高或频率，I 代表音强或响度，T 代表音色，t 代表时值，以音乐声的四个要素为四个轴，括弧内给出有关的领域。

§4.2 音乐声的音高表示——音名、唱名和记谱

4.2.1 现代音名及记法

要给具有一定音高的音定个名，这就是音名（Pitch Name)。比如英国、美国、苏联及世界上许多国家通用的 C、D、E、F、G、A、B 或中国古代的黄钟、大吕、应钟等。不同时期，对不同律制，同名音的音高是不同的。

我们主要介绍现代音名。为简单起见，我们先看键盘乐器上的一组内十二个音，即一个

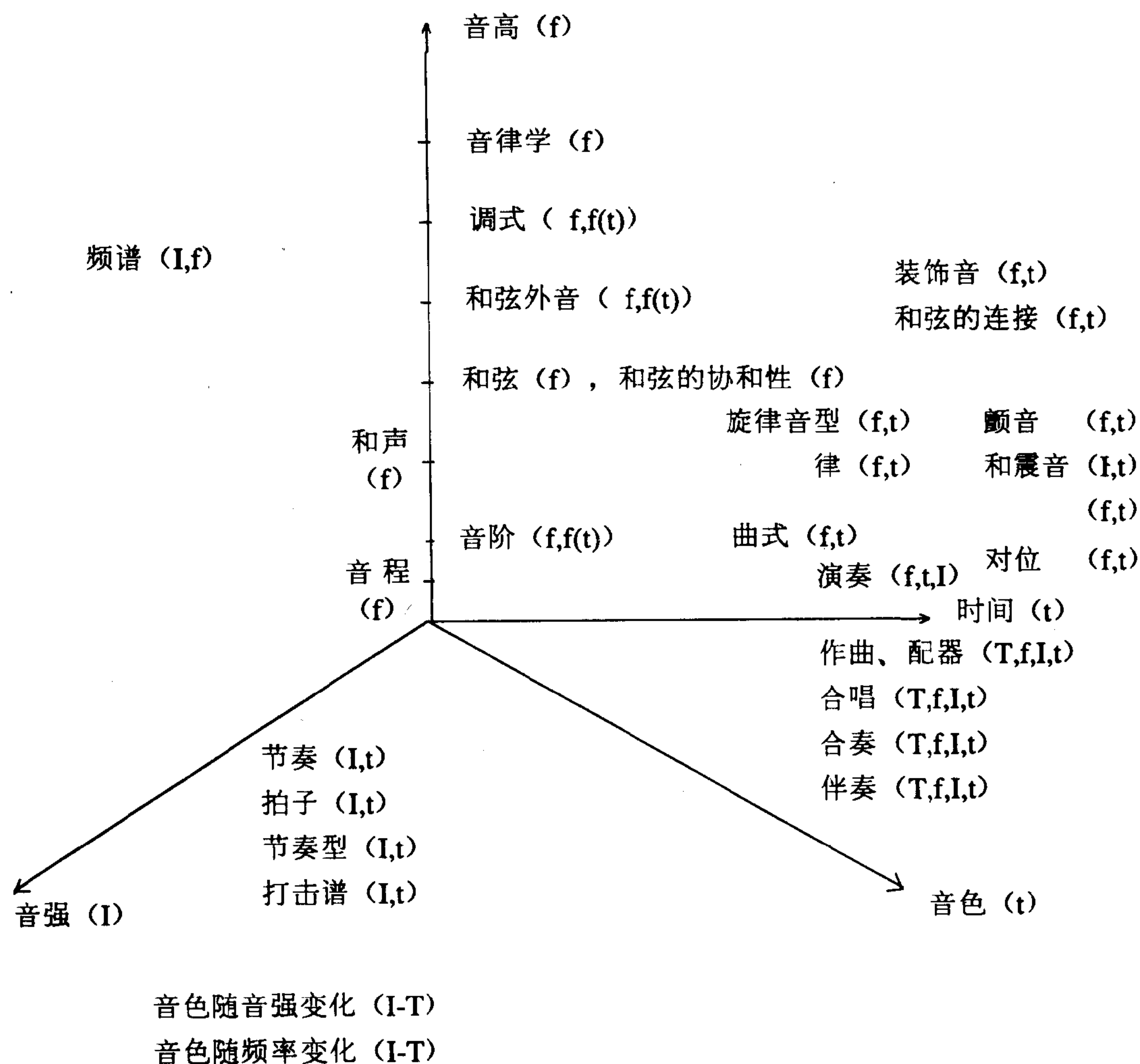


图 4-1　音乐的构成

“八度”内的十二个音。如图 4-2 所示：

C、${}^{\#}$C（或^{b}D）、D、${}^{\#}$D（或^{b}E）、E、F、${}^{\#}$F（或^{b}G）、G、${}^{\#}$G（或^{b}A）、A、${}^{\#}$A（或^{b}B）、B，这七个英文字母连同五个带有升号“#”或降号“b”的字母共十二个，称为音名。在不用指出它属于哪一组音（不同高低的八度音）时，常常用大写字母表示，如表示调号等，但也有用小写的。* 大多数乐器或人的歌唱，可以跨越不止一个八度；而且，各种乐器的音高区域或高

* 我们在简单的情况下，即以使用十二平均律的键盘乐器来表示音名。这时，${}^{\#}$C=^{b}D，${}^{\#}$D=^{b}E，${}^{\#}$F=^{b}G，${}^{\#}$G=^{b}A，${}^{\#}$A=^{b}B。实际上，每个音有升（#）、降（b）、重升（x）、重降（bb）音。在不是十二平均律的情况下，${}^{\#}$C≠^{b}D，^{x}C≠D，……。英文是 sharp（#）、Flat（b）、double sharp（x）、double Flat（bb）。

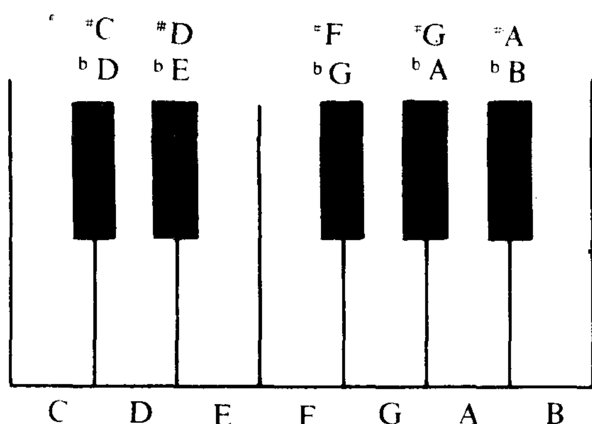


图 4-2 音名与键盘

或低，有很大差别。如何表示其音名呢？以钢琴为例，我们通常把钢琴上钥匙孔左侧两个黑键下方的白键称为中央 C，这个键的音名叫做小字一组 c^1，即在小写的英文字母右上角加一个数字 1。顺序向音高升高处为小字一组的其他音。c^1 的高八度音是 c^2，从此开始的各音叫做小字二组。依此类推是小字三组、小字四组……一直到 c^5。从 c^1 开始向音高降低处为小字组、大字组、大字一组、大字二组。如图 4.3 琴键上所示。这是目前在音乐中用得最普遍的一种通用的音名记法。说出一个音名，就标志一定的音高，可以在乐器上找到它的发音部位。*

另一种标法则都以英文大写字母，在每字右侧并写一阿伯数字，如 A0、C1、C2、C3、C4、……（如图 4-4 的第二排）。

第三种方法是从钢琴最低音键开始以数字顺序编号，以最低音键为 1 号键，其音叫 1 号音，连同白键、黑键，向右（即音高升高方向）顺序排列，对于标准钢琴来说，一共有 88 个键故有 88 个音。这对钢琴制造或计算机音乐中常用到。图 4-4 表出上述三种音名标示方法的对照关系。

另外，还有一种声学用音名，它都用大写英文字母表示，在右下侧加以数字角注，如图 4-3 的第一排所示。

用钢琴键来表示音高，是因为一般说来，各种乐器其基频的音高都会这个范围之内。最大型的管风琴的低音会低于钢琴的最低音，但对于某台专门的琴，已用不到用钢琴的键名去命名各键的音高了。

当前合成器上还另有命名法

4.2.2 五线谱（Staff，Stave）

世界上多数国家和地区以及大部分乐器通用五线谱记录音高。五线谱的高音谱表（Treble Staff）（即 G 谱表，谱号从 G 开始）（图 4-5 (a)）和低音谱表（Bass Staff）（即 F 谱表，谱号从 F 线始）（图 4-5 (b)）连在一起，中间有一条线即中央 C（c^1），这种把两个五线谱的高低音谱表连在一起，加上中间的实际上存在的一条线，也称十一线谱表或大谱表（Great Staff），如图 4-5 (c) 所示。

五线谱还常用一种 C 谱表（C Staff），即以“弓”记号中间对应的“间”或“线”作为 c^1。如图 4-5 (d)、(e) 所示。

---

* 德国、奥地利把音名 C、D E F G A B 称为 C D E F G A H，而把升半音加写一个 is。例如，#C 是 Cis，重升为 Cisis，降半音加写一个 es，如♭D 是 Des，重降为 Deses。例外的是降 H 写成 B，降 A 写成 As，降 E 写成 Es。

法国和意大利把 Do（法国也叫 ut）、re、mi、fa、sol、la、si 作为音名。它们的升降也有各自的写法。法国的升号叫 diese，例如升 re 是 re diese，重升 re 是 re double diese，降号叫 bemol，降 mi 是 mi bemol，重降 mi 是 mi double bemol。意大利文升 re 是 re diesis，重升 re doppio diesis，降 mi 是 mi bemolle，重降 mi 是 mi doppio bemolle。

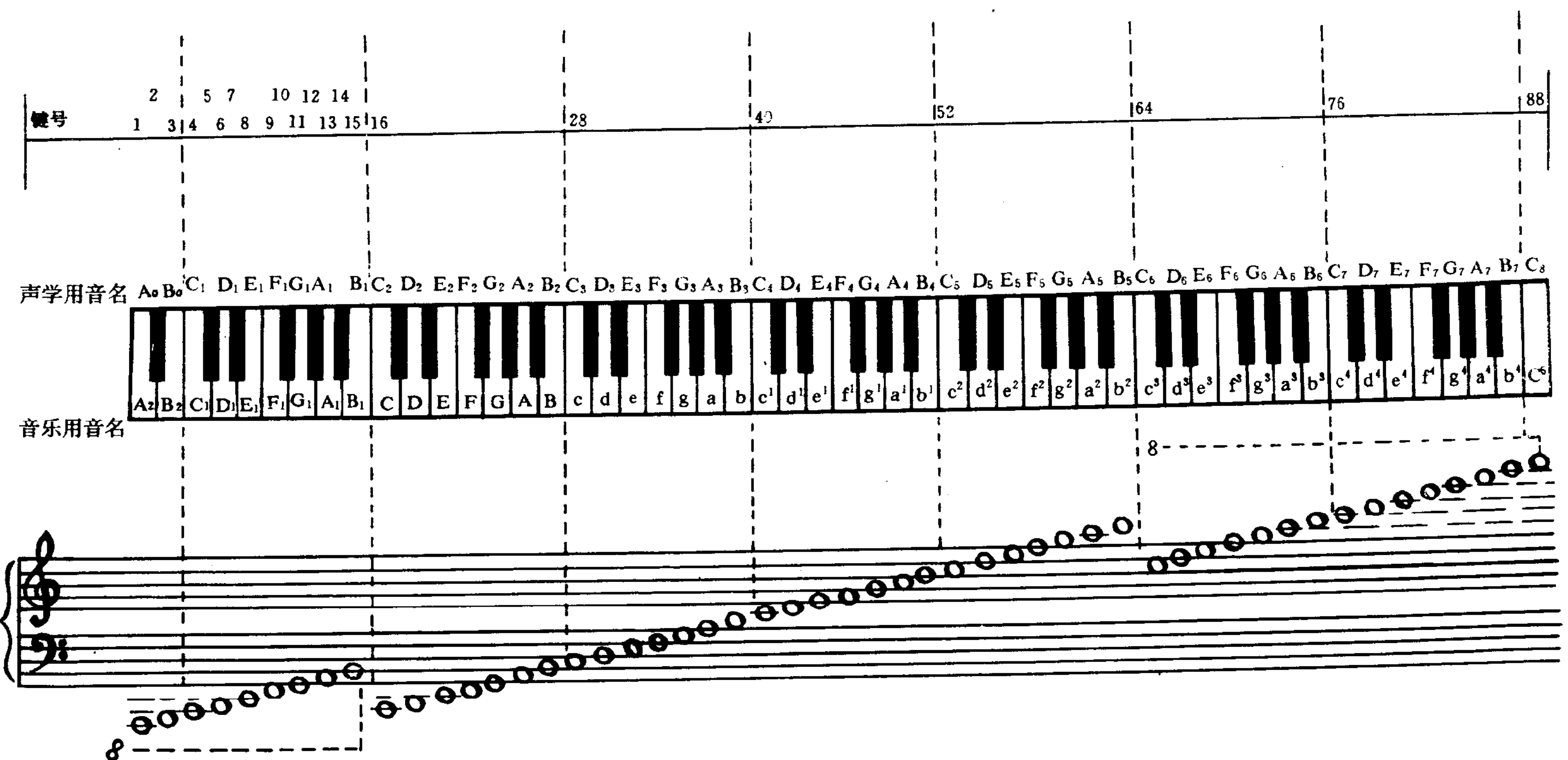

键号
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 28 40 52 64 76 88
声学用音名
A_0 B_0 C_1 D_1 E_1 F_1 G_1 A_1 B_1 C_2 D_2 E_2 F_2 G_2 A_2 B_2 C_3 D_3 E_3 F_3 G_3 A_3 B_3 C_4 D_4 E_4 F_4 G_4 A_4 B_4 C_5 D_5 E_5 F_5 G_5 A_5 B_5 C_6 D_6 E_6 F_6 G_6 A_6 B_6 C_7 D_7 E_7 F_7 G_7 A_7 B_7 C_8
音乐用音名
A_2 B_2 C_1 D_1 E_1 F_1 G_1 A_1 B_1 C D E F G A B c d e f g a b c^1 d^1 e^1 f^1 g^1 a^1 b^1 c^2 d^2 e^2 f^2 g^2 a^2 b^2 c^3 d^3 e^3 f^3 g^3 a^3 b^3 c^4 d^4 e^4 f^4 g^4 a^4 b^4 c^5
8
8

图4-3 琴键

A_2	C_1	C	c	c^1	c^2	c^3	c^4	c^5
A0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
1	4	16	28	40	52	64	76	88

图 4-4　3 种音名标注对照图

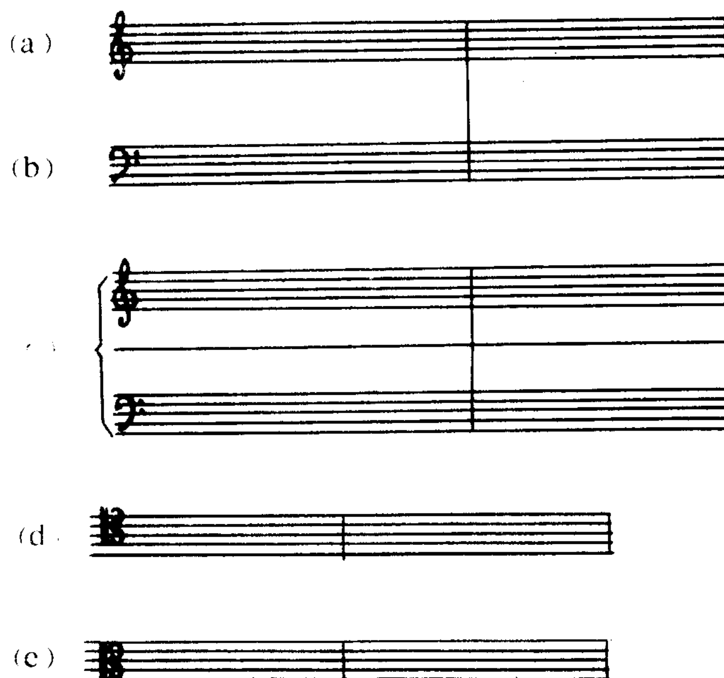


图 4-5　五线谱表

有据可查的是，五线谱在清康熙年间已经传入我国。

五线谱的优点是：

1）音符在谱上的高低位置形象地表示了音的高低，因此，五线谱上的旋律线与音高随时间的变化是对应的。

2）音符在谱上的疏密排列形象地反映了音的密集程度即时值的长短。

3）五线谱上的每一线和每间都反映一定的音高，因此，音符的位置与乐器的键盘或弦乐器的把位、管乐器的指位一一对应。对于乐器的掌握特别是视奏有很大方便。

4）五线谱可以用较少的空间表示出和弦。

5）由于以上一些优点，乐队总谱必须用五线谱。它占有较少的篇幅，又形象地表示出了各种乐器的进入、退出，旋律、和声的进行等。

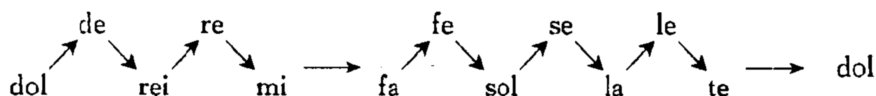
4.2.3　唱名

从历史发展到今，现在世界上许多国家通用英美唱名，把自然大音阶唱成：

dol rei mi fa sol la te dol 。

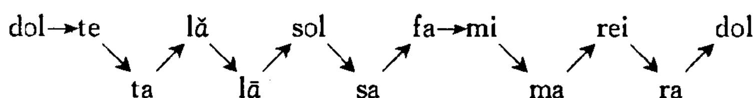
也常常把升高的半音唱成原来的辅音加“e”（i:）声，即

升半音



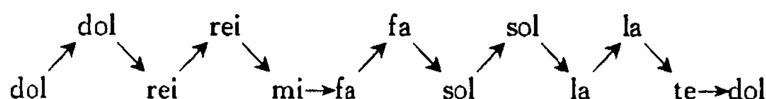
常常把降低的半音唱成原来的辅音加“a”(ei)声，即

降半音

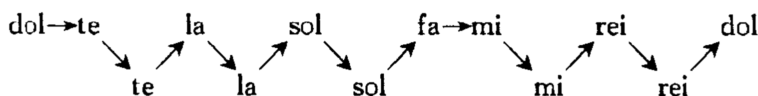


也有时升、降音还都按原音唱名，即

升半音



降半音



2. 固定唱名法和首调唱名法

不管是什么调，C 音都唱 dol，D 音都唱 rei，……，这就是固定唱名法。

固定唱名法读谱比较简单，音名就是唱名，如法国、意大利等国家就是这样；对于学习乐器，只要记一套符号；可以训练绝对音高；在无调性音乐里也是适宜的，这些都是固定唱名法的优点。但是，除了升、降号较少，如只有一、二个升、降号的调以外，即使是受过音乐专业训练的人，也常常难以唱准。因为每一个音名就有五种音高，即原音加升、降、重升、重降。因此对于在习惯于首调唱法及简谱的我国群众中推广普及固定唱名法显然是不恰当的。而且因此固定唱名法更难于体现在各个不同调上不同音的增减音程。只有把乐理学习得非常透彻以后才好掌握。

把自然大调式的主音唱作 dol，而不管它是什么音；把自然小调式的主音唱作 la，以后也不管它是什么音名，依次顺序唱出。例如自然大调式都唱成 dol、rei、mi、fa、sol、la、te、dol，自然小调式都唱成 la、te、dol、rei、mi、fa、sol、la，而不管主音是什么音名的音，这就是首调唱法（Tonic-sol-fa），也叫流动 dol 音唱法或流动 la 音唱法。

首调唱法反映了音阶里各个音之间的自然关系，符合和声的习惯和规律，容易转调或换调，适用于简谱，易唱准。首调唱法符合一般人特别是非专业音乐工作者的音乐及唱歌习惯，特别是我国，在一般音乐爱好者及学生中应该提倡这种唱法。而对于专业音乐工作者也同时要熟悉首调唱法。这样，对多数人来说，能够唱准，而且如果要对乐谱改调，演奏或伴奏的话，也不会发生过大的困难，而且有利于在演奏中掌握培养音程感。

4.2.4 简谱（Cheve System）

简谱来源于欧洲，相传是卢梭发明的，后经葛林（Golin）、巴丽（Paris）、谢威（Cheve）改进，称葛、巴、谢谱，简称谢氏谱，也称数字谱。

简谱是适应于首调唱名法的一种记谱法。

即把	dol	rei	mi	fa	sol	la	te	dol
对应	1	2	3	4	5	6	7	$\dot{1}$ 。

简谱的优点是：

1）简单、易唱、易记；

2）容易唱得准，因为用的是首调唱法；

3）对于有些伴奏乐器或乐器的伴奏部分，用简谱比用线谱更为简单有效。如手风琴的左手和弦，用简谱就比线谱来得优越，因为它的左手伴奏部分是按五度关系排列的。因此，不管什么调，简谱只需用一种符号、一种指法，不同的调只需上、下平行移动就可以了，而线谱则对于不同调的同样级的和弦有不同的“图形”，把问题复杂化了。对于吉他的伴奏部分也是同样的。

简谱的缺点是它不反映绝对音高，不与键盘或乐器上的把位等一一对应，用它来表示多声部或钢琴谱或乐器总谱就会显得累赘了。

4.2.5 其他记谱法

我国历史上曾有过多种记谱法。

在汉魏之交时，出现文字谱，记录了琴调（定弦法），把全曲分拍（段），每拍又分若干句，每句又记下一定的弦位和徽位，用一定的名称描述指法等。到了中唐时期，又发展成了“减字谱”，规定了一些左右手的基本指法和记法，并把文字谱的字简化。用一个字符代表了弦位和指法。到唐末，减字谱又有进一步的简化，用十三个符号，每一个符号同时表示了左右手的指法及弦位。

晚唐、五代时出现了工尺谱，一般说来属于首调唱名法，与简谱对应如下：

工尺谱：	上（或合）	尺	工	凡	六	五	乙
简谱	1	2	3	4	5	6	7

低一、两个八度时，除六、五改成合、四外，其它名字加“ ”（一个八度）或“ ”（两个八度）高一个八度加“亻”，高两个八度加“彳”，如“亻上”、“彳上”等。叠音（重复演奏）用“、”，如“五、”。豁音（音后加二、三度的轻上滑音）用“✓”，如“五✓”。落音（音后加下滑音）用“，”如伍，撤音（颤音）等都可表示。还可以表示调，如上字调相当于$^{\flat}$B调、尺字调（C）、小工调（D）、凡字调（$^{\flat}$E）、六字调（F）、五字调（正宫调G）、乙字调（A）等。另外，已有了拍子符号，现在的4/4拍子是一板三眼等。

另外，还有过原始的以结绳记谱，古代以弯曲的形象（声曲折）记谱等。

§4.3 音高的距离——音程（Interval）

所谓音程就是两个音的音高间的距离。我们先按十二平均律来最简单地介绍音程。

在音乐上，音程用“度”来表示，在音乐声学中，音程还用频率比或音分来表示。这里我们先来看以“度”表示的音程。关于音程的某些进一步的讨论将放到第五章《音律学》中去。

按简谱唱名，1-$\dot{1}$是八度（Octave），1-5、2-6 是五度（Fifth），1-4、3-6、5-$\dot{1}$是四度（Forth）。说是几度，就是连开始音也算上，沿着音阶进行数几个音名。

钢琴上相邻两个键（包括黑键）之间差半音。

两个半音等于一个全音。

各种音程（度）包括几个半音或全音的关系如下：

度	全音个数	半音个数
同度	0	0
小二度	0.5	1
大二度	1	2
小三度	1.5	3
大三度	2	4
纯四度	2.5	5
增四度	3	6
纯五度	3.5	7
小六度	4	8
大六度	4.5	9
小七度	5	10
大七度	5.5	11
八度	6	12

用“度”来表示音程，对于平均律来说，一定的“度”，是有一定的频率比的；而对于不同的音高，同样的“度”，其频率的绝对差是不同的。然而，在其他不同律制下的不同调式中，不同位置的音，同样“度”的音程，其音高的频率比也是不尽相同的。上述表中我们除了增四度外，没有使用其他的增音程或减音程。

§4.4 音高的排列——音阶和调式

4.4.1 音阶（Scale）

把一个八度内的几个音按音的高低顺序排列起来，就成为音阶。最常用的有包括七个音的七声音阶，包括五个音的五声音阶或包括十二个音的半音阶，还有过包括六个音的全音阶等。

音阶中各个音之间的排列方式不同，构成不同的调式，所以音阶也称作调式音阶。

4.4.2 调式概述

从乐音的时间和空间观点来看，调式（Modes）有以下几个要点：

1）调式是对一个完整的音乐作品而言的，至少有一定的旋律。因此，它不仅包括音阶中各个音的高低关系，还是在一个时间延续的过程中的产物。

2）每一种调式有一个调式主音，它是一首音乐作品中的最主要的音，一般情况下，它的出现次数最多，或累计出现的时间最长或更多是兼而有之。可以说其它的音都围绕着这个调式主音运动。通常，主音的上五度音（属音）和下五度音（下属音，即上四度音）是调式中

其次重要的音，一般它们出现的次数和累计的时间略次于主音，但比调式中其他的音要多。

3）从调式主音开始，音阶中各个音之间的排列方式不同就构成不同调式，如自然大调式、自然小调式、和声小调式、中国汉族五声音阶中的各个调式（“1（dol）”调式等）、古希腊的弗里吉安调式、多里安调式、欧洲中世纪各种调式等等。

4）大多数音乐作品结束在调式主音上。但也有结束在主和弦的其他音上。作为有和声的多声部或多乐部作品，一定结束在主和弦上。

5）根据以上几点，不论是对作品的客观分析（各音出现的次数，累计的时间，结束音和结束和弦）和主观感觉，都可以确定音乐作品的调式。曾经用计算机作过简单音乐作品（不转调）的分析，结果极大多数是正确的。

4.4.3 七声音阶调式

先介绍几种当前最普遍使用的调式，即几种由七个音组成的七声音阶调式（Seven Tone Modes）：

1）自然大调式

如果从调式主音作为第一音开始，按音高升高方向排列，第三、四音之间和第七、八音（第八音即调式主音的高八度音）之间的音程是半音（小二度），其余各相邻音之间的音程是全音（大二度），即构成自然大音阶（Diatonic Major Sicale），或自然大调式（Diatonic Major Modes）。听起来，就是：

dol、rei、mi、fa、sol、la、te、dol（高八度）

现在我们把自然大调式音阶中的各音及其关系罗列如下。除主音外，各音也有名称。

音的顺序	第一音	第二音	第三音	第四音	第五音	第六音	第七音	第八音（高八度）
名　称	主音	上主音	上中音	下属音	属音	下主音	导音	主音（高八度）
唱　名	dol	rei	mi	fa	sol	la	te	dol
简谱记法	1	2	3	4	5	6	7	$\dot{1}$
相邻两音的音程	大二度（全音）	大二度（全音）	小二度（半音）	大二度（全音）	大二度（全音）	大二度（全音）	小二度（半音）	

例如，以C为主音的自然大调式就是C大调，或写作1=C，以^{b}B为主音的自然大调式就是^{b}B大调，或写作1=^{b}B。共有十二种自然大调。

2）自然小调式

如果从调式主音作为第一音开始，按音高升高方向排列，第二、三音之间和第五、六音之间的音程是半音，其余各相邻音之间的音程是全音，即构成自然小音阶（Diatonic Minor Scale），或自然小调式（Diatonic Minor Modes）。听起来就是：

la、te、dol、rei、mi、fa、sol、la（高八度）。

下面列出自然小调式音阶中的各音及其关系：

音的顺序	第一音	第二音	第三音	第四音	第五音	第六音	第七音	第八音（高八度）
名　称	主音	上主音	上中音	下属音	属音	下主音	导音	主音（高八度）
唱　名	la	te	dol	rei	mi	fa	sol	la
简谱记法	$\underset{\cdot}{6}$	$\underset{\cdot}{7}$	1	2	3	4	5	6
相邻两音的音程		大二度（全音）	小二度（半音）	大二度（全音）	大二度（全音）	小二度（半音）	大二度（全音）	大二度（全音）

例如，以 c 为主音的自然小调式就是 c 小调，记作 $\underset{\cdot}{6}$=c，与 1=$^{\flat}$E 即$^{\flat}$E 大调具有共同的音阶音。一共有十二种自然小调。

3）和声小调式

从调式主音作为第一音开始，按音高升高方向排列，第二、三音，第五、六和第七、八音（第八音是主音的高八度音）之间的音程是半音，第六、七音之间是一个全音加一个半音即增二度（平均律上等于十三度），其余相邻各音之间是全音，即构成和声小音阶（Harmonic Minor Scale），或和声小调式（Harmonic Minor Modes）。唱起来就是

la 、 te 、 dol 、 rei 、 mi 、 fa 、 se 、 la （高八度）

列表表示如下：

音的顺序	第一音	第二音	第三音	第四音	第五音	第六音	第七音	第八音(高八度)
唱　名	la	te	dol	rei	mi	fa	se	la
简谱记法	$\underset{\cdot}{6}$	$\underset{\cdot}{7}$	1	2	3	4	#5	6
相邻两音的音程		大二度（全音）	小二度（半音）	大二度（全音）	大二度（全音）	小二度（半音）	小三(或增二)度（全音+半音）	小二度（半音）

同样，有十二种和声小调式，也记作

$\underset{\cdot}{6}$=?。

4）旋律小调式

当自然小调式中，旋律上行时，第六、七音升高半音；旋律下行时，恢复自然小调式，这就构成旋律小调式（Melodic Minor Modes）。听起来是：

上行 la 、 te 、 dol 、 rei 、 mi 、 fe 、 se 、 la （高八度），

下行 la 、 sol 、 fa 、 mi 、 rei 、 dol 、 te 、 la （高八度）。

罗列如下：

上行：

音的顺序	第一音	第二音	第三音	第四音	第五音	第六音	第七音	第八音(高八度)
唱　名	la	te	dol	rei	mi	fa(fe)	sol(se)	la
简谱记法	$\underset{\cdot}{6}$	$\underset{\cdot}{7}$	1	2	3	#4	#5	6
相邻两音间音程关系	大二度 (全音)	小二度 (半音)	大二度 (全音)	大二度 (全音)	大二度 (全音)	大二度 (全音)	小二度 (半音)	

下行：

音的顺序	第八音(主音)	第七音	第六音	第五音	第四音	第三音	第二音	第一音
唱　名	la	sol	fa	mi	rei	dol	si	la
简谱记法	6	#5	#4	3	2	1	$\underset{\cdot}{7}$	$\underset{\cdot}{6}$
相邻音间音程关系	大二度 (全音)	大二度 (全音)	小二度 (半音)	大二度 (全音)	大二度 (全音)	小二度 (半音)	大二度 (全音)	

还有其他的 t 声音阶，如旋律大音阶、和声大音阶等，因用得很少，在此不一一介绍。

关于古希腊的 t 声音阶调式和欧洲教堂音乐的 t 声音阶调式，我们将在后面简单介绍。

应当指出的是，在某一首音乐作品中，有时出现非调式音阶的音，如临时升降音等，这是允许的，并不影响这个作品的调式。

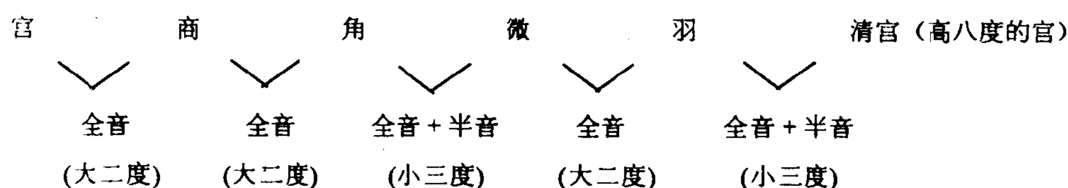
还有，大型作品中，有时一整段进入其他调式。把它看作是非单一调式的作品还是作为对比、变化，就要看其所占的比例，具体分析了。

4.4.4 中国汉族五声音阶调式

(Chinese Five Tone Modes)

自古以来，我国汉族音乐用五声音阶调式，周朝时在五声基础上又加上变徵、变宫，变成七声音阶，于是就有了两类调式。其中五声音阶应用得是很普遍的。实际上，我国许多少数民族也用这种五声音阶调式。

五声音阶的宫、商、角、徵、羽共五声，这五声可称作是“阶名”，与“唱名”相当。它们之间的音程关系是：



于是，有五种基本调式：

1）宫调式（“1（dol)”调式）

从第一音调式主音开始，按音高升高的顺序排列，第三、四音和第五、六音之间的音程是小三度，其余各相邻音之间的音程是大二度，就构成“宫”调式或叫“1（dol)”调式。列出如下：

音的顺序	第一音(主音)	第二音	第三音	第四音	第五音	第六音(高八度的主音)
阶　名	宫	商	角	微	羽	清宫
相应的唱名	dol	rei	mi	sol	la	dol
简谱记法	1	2	3	5	6	1̇
相邻音之间音程关系		大二度	大二度	小三度	大二度	小三度

宫调式记作 1＝C，1＝^{b}B 等。*

2）商调式（“2（rei)”调式）

从第三音调式主音开始，按音高升高顺序排列，第二、三音和第四、五音之间的音程是小三度，其余各相邻音之间的音程是大二度，就构成“商”调式，或叫“2（rei)”调式。列出如下：

音的顺序	第一音（主音）	第二音	第三音	第四音	第五音	第六音(高八度的主音)
阶名	商	角	徵	羽	宫	半商
相应的唱名	rei	mi	sol	la	dol	rei
简谱记法	2	3	5	6	1̇	2̇
相邻音之间音程关系		大二度	小三度	大二度	小三度	大二度

* 中国汉族五声音阶的阶名中高八度称为“清”或“半”，如宫的高八度音为“清宫”，商的高八度音为“半商”等。“清”是取音高为清之意，“半”是指弦长或管长减为一半。

商调式记作 2＝D，2＝B 等。相对于自然大音阶来说，2＝D 与 C 大调的演唱或演奏法相同，2＝B 则与 A 大调相同。

3）角调式（“3（mi）”调式）

从第一音调式主音开始，按音高升高顺序排列，第一、二和第三、四音之间的音程是小三度，其余各相邻音之间的音程是大二度，就构成“角”调式，或叫“3（mi）”调式。列出如下：

音的顺序	第一音（主音）	第二音	第三音	第四音	第五音	第六音(高八度的主音)
阶 名	角	徵	羽	宫	商	半角
相应的唱名	mi	sol	la	dol	rei	mi
简谱记法	3	5	6	$\dot{1}$	$\dot{2}$	$\dot{3}$
相邻音之间音程关系		小三度	大二度	小三度	大二度	大二度

角调式记作 3＝F，3＝C 等。相对于自然大音阶，3＝F 与 ^{b}D 大调的演唱、演奏法相同；3＝C 与 ^{b}A 大调相同。

4）徵调式（“5（sol）”调式）

从第一音调式主音开始，按音高升高顺序排列，第二、三和第五、六音之间的音程是小三度，其余各相邻音之间的音程是大二度，就构成“徵”调式或叫“5（sol）”调式。列出如下：

音的顺序	第一音（主音）	第二音	第三音	第四音	第五音	第六音(高八度的主音)
阶 名	徵	羽	宫	商	角	半徵
相应的唱名	sol	la	dol	rei	mi	sol
简谱记法	$\underset{\cdot}{5}$	$\underset{\cdot}{6}$	1	2	3	5
相邻音之间音程关系		大二度	小三度	大二度	大二度	小三度

徵调式记作 5＝A，5＝C 等。相对于自然大音阶，5＝A 与 D 大调的演唱、演奏方法相同，5＝C 与 F 大调相同。

5）羽调式（“6（la）”调式）

从第一音调式主音开始，按音高升高顺序排列，第一、二和第四、五音之间的音程是小三度，其余各相邻音之间的音程是大二度，即构成“羽”调式，或叫“6（la）”调式。列出如下：

音的顺序	第一音（主音）	第二音	第三音	第四音	第五音	第六音(高八度的主音)
阶　名	羽	宫	商	角	徵	清羽
相应的唱名	la	dol	rei	mi	sol	la
简谱记法	6（下加点）	1	2	3	5	6
相邻音之间音程关系	小三度	大二度	大二度	小三度	大二度 c	

羽调式记作 6＝F，6＝^{b}A 等。相对于自然大音阶，6＝F 与^{b}A 大调的演唱、演奏方法一样，6＝^{b}A 则与 B 大调相同。

五声音阶调式与 t 声音阶调式的区别在于是否出现“间音（偏音）即“fa”和“te”音。但是要注意记谱上的差别及移调。为了明显起见我们用简谱表示，例如：

1＝C $\frac{4}{4}$

1 12 3 32 1 16 5 | 2 23 5 53 2 -

5 56 7 76 5· 3 2 | 5 56 i· 6 5 -

实际上是：

1＝C

1 12 3 32 1 16 5 | 2 23 5 53 2 - |

(1＝G 1＝前5) 1 12 3 32 1· 6 5 | (1＝F 2＝前1) 2 23 5· 3 2 - ‖

还是五声音阶。当然，常常还要从乐曲的整体来分析才能判断。

4.4.5 其他五声音阶调式

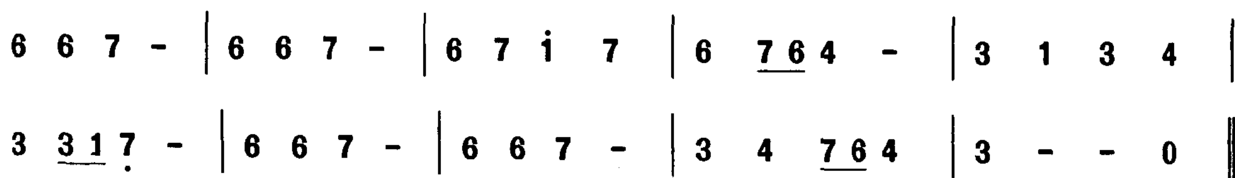
古希腊也有五声音阶调式，它的构成是：第一、二和第四、五音之间的音程是半音，第二、三和第五、六音之间的音程是两个全音，第三、四音之间是一个全音，称为半音五声音阶（Semitonal Penta Scale）调式。

列出如下：

音的顺序	第一音（主音）	第二音	第三音	第四音	第五音	第六音(高八度的主音)
音名（例）	E	F	A	B	C	E'
相应的唱名	mi	fa	la	te	dol	mi
简谱记法	3	4	6	7	i̇	3̈
相邻音之间音程关系	小二度（半音）	双全音	全音	半音	双全音	

这与日本一些民歌的五声音阶调式是类似的。但希腊是从“3”开始，而日本是从“6”开始，即“671 3 4”调式，为明显起见，用简谱表示）如日本近代民歌“樱花”就是：

1＝♭E $\frac{4}{4}$



半音五声调式还有一种即：

音的顺序	第一音（主音）	第二音	第三音	第四音	第五音	第六音(高八度的主音)
音　名	C	E	F	G	B	C'
唱　名	dol	mi	fa	sol	te	dol
简谱记法	1	3	4	5	7	i̇
相邻音之间音程关系	双全音	半音	全音	双全音	半音	

也是有两个半音、两个双全音、一个全音。

还有一种叫等程五声音阶（Pentaphonic Scale）调式，这是爪哇人特有的调式，每两个音之间的距离是相等的，都是八度音程的五分之一，称沙伦多（Salendro），等等。

4.4.6 古希腊七声音阶调式

下面把古希腊七声音阶调式给予简单介绍，只列举各种调式音程之间的关系。

1）多里安（Dorian）调式

以下各音之间的音程关系构成多里安调式。

前四个音间和后四个音间的音程关系是一样的，即都是前二个音之间（一、二音之间和五、六音之间）是半音，其余各音之间是全音。这样前后结构相同的调式称为正格调式(Authentic)。

以各个音为主音都可以建立多里安调式。

音的顺序	第一音(主音)	第二音	第三音	第四音	第五音	第六音	第七音	第八音(高八度的主音)
相邻音间关系		半音	全音	全音	全音	半音	全音	全音
唱名	mi	fal	sol	la	‖ te	dol	rei	mi
简谱记法	3̣	4̣	5̣	6̣	‖ 7̣	1	2	3

2）弗里吉安（Phrygian）调式

弗里吉安调式各音之间的音程关系如下：

音的顺序	第一音(主音)	第二音	第三音	第四音	第五音	第六音	第七音	第八音(高八度的主音)
相邻音间关系		全音	半音	全音	全音	全音	半音	全音
唱名	rei	mi	fa	sol	‖ la	te	dol	rei
简谱记法	2	3	4	5	‖ 6	7	1̇	2̇

弗里吉安调式也是正格调式，即前四个音与后四个音有同样的音程关系。

3）利地安（Lydian）调式

利地安调式的各音之间的音程关系如下：

音的顺序	第一音(主音)	第二音	第三音	第四音	第五音	第六音	第七音	第八音(高八度的主音)
相邻音间关系		全音	全音	半音	全音	全音	全音	半音
唱名	dol	rei	mi	fa	‖ sol	la	te	dol
简谱记法	1	2	3	4	‖ 5	6	7	1̇

利地安调式也是正格调式，其前后两半的音程构成关系也是一样的。

4）米索利地安（Mixolydian）调式

米索利地安调式各音间音程关系如下：

音的顺序	第一音(主音)	第二音	第三音	第四音	第五音	第六音	第七音	第八音(高八度的主音)
相邻音间关系		半音	全音	全音	半音	全音	全音	全音
唱 名	te	dol	rei	mi	fa	sol	la	te
简谱记法	7̣	1	2	3	4	5	6	7

米索利地安调式前四音之间与后四音之间的音程关系是不同的，称为副格调式（Plagal)。

5）海波多里安（Hypodorian）调式

海波多里安调式各音音程间的关系如下：

音的顺序	第一音(主音)	第二音	第三音	第四音	第五音	第六音	第七音	第八音(高八度的主音)
相邻音间关系		全音	半音	全音	全音	半音	全音	全音
唱 名	te	dol	rei	mi	fa	sol	la	te
简谱记法	6̣	7̣	1	2	3	4	5	6

这也是副格调式

6）海波弗里吉安（Hypophrygian）调式

海波弗里吉安调式各音音程间的关系如下：

音的顺序	第一音(主音)	第二音	第三音	第四音	第五音	第六音	第七音	第八音(高八度的主音)
相邻音间关系		全音	全音	半音	全音	全音	半音	全音
唱 名	sol	la	te	dol	rei	mi	fa	sol
简谱记法	5̣	6̣	7	1	2	3	4	5

这也是个副格调式。

7）海波利地安（Hypolydian）调式

海波利地安调式各音音程间关系如下：

音的顺序	第一音(主音)	第二音	第三音	第四音	第五音	第六音	第七音	第八音(高八度的主音)
相邻音间关系	全音	全音	全音	半音	全音	全音	半音	
唱 名	fa	sol	la	te	dol	rei	mi	fa
简谱记法	$\underset{\cdot}{4}$	$\underset{\cdot}{5}$	$\underset{\cdot}{6}$	$\underset{\cdot}{7}$	1	2	3	4

这也是个副格调式

所有以上各种调式，都可以由任何一个音作为主音，因此，一共有七种调式，每种调式十二个调，一共有八十四种调式音阶。

4.4.7 欧洲教堂音乐调式（Church Modes）

欧洲教堂音乐调式是由古希腊调式演化而来的，与古希腊调式有相似的结构，都是用自然大调音阶，取不同的主音组成。现在把欧洲教堂调式与古希腊调式的对应关系列出如下：

古希腊调式	音程关系（简谱表示）	欧洲教堂调式
多里安	3 4 5 6 7 $\dot{1}$ $\dot{2}$ $\dot{3}$	弗里吉安（Phrygian）
弗里吉安	2 3 4 5 6 7 $\dot{1}$ $\dot{2}$	多里安（Dorian）
利地安	1 2 3 4 5 6 7 $\dot{1}$	艾奥尼安（Ionian）
米索利地安	$\underset{\cdot}{7}$ 1 2 3 4 5 6 7	洛克利安（Locrian）
海波多里安	$\underset{\cdot}{6}$ $\underset{\cdot}{7}$ 1 2 3 4 5 6	伊奥利安（Aeolian）
海波弗里吉安	$\underset{\cdot}{5}$ $\underset{\cdot}{6}$ $\underset{\cdot}{7}$ 1 2 3 4 5	米索利地安（Mixolydian）
海波利地安	$\underset{\cdot}{4}$ $\underset{\cdot}{5}$ $\underset{\cdot}{6}$ $\underset{\cdot}{7}$ 1 2 3 4	利地安（Lydian）

以上七种欧洲教堂调式都称为正格调式，以其下方四度音为主音的称为副格调式，冠以海波（Hpyo），例如海波多利安调式即 $\underset{\cdot}{6}$ $\underset{\cdot}{7}$ 1 2 3 4 5 6。

七种调式都可以以任何音为主音而构成八十四种调，实际上其中有许多是不用的。

艾奥尼安即自然大调式，伊奥利安即自然小调式。实际上，现今通用的主要的调式只是自然大、小调式及和声、旋律小调式。

§4.5 音高的时间构成——旋律和曲式

4.5.1 旋律（Melody）

乐音随着时间的延续、变化，构成旋律。再细分一些，先是由几个音构成“动机”(Motive)，然后构成“乐节”(Phrase)、“乐句”(Sentence) 和“乐段”(Period)。这些就是音乐的旋律，或叫做曲调。

4.5.2 曲式（Musical Form）

曲式是乐曲或歌曲旋律的组合方式。

最简单的音乐作品即乐曲或歌曲是单段体（Continuation Form），如四句的山歌或小曲。也还有一些大型的曲子，连续发展变化，没有变奏，如不少咏叹调，也是单段体。

复杂类型的曲式基本的有单二段体（Binary From）：即乐段A＋乐段B。有副歌形式的歌曲许多是单二段体。如“国际歌”等。

单三段体（Ternary Form）：即A+B+A。不少钢琴曲如《牧童短笛》（贺绿汀）、《G大调小步舞曲》（贝多芬）及歌曲如“歌唱祖国”（王莘）等都是单三段体。

复二段体（Compound Binary）：二段体中每一段是单二段体或单三段体，叫复二段体，即A（a+b或a+b+a）+B（c+d或c+d+c）。

复三段体（Compound Termary）：三段体中每段是单二段体或单三段体，叫复三段体，即A（a+b或a+b+a）+B（c+d或c+d+c）+A（a+b或a+b+a）等。

奏鸣曲式（Sonata Form）：这是一种有一定格式的复三段体，有呈示部，展开部和再现部，其中每一个部可以有一个或几个主题及其发展。*

回旋曲式（Rondo Form）

回旋曲式的构成是A+B+A+C+A（+D+A……），即不断插入新的乐段B、C、D……，但都回到A。如“致爱丽丝”（贝多芬）等。

变奏曲式（Variation Form）：

即A+A′+A″……，如《少女的祈祷》（巴达茨维斯卡）等。

以上这些是基本曲式，乐曲的构成千变万化，而且会有许多开始、结尾变奏等。不一定要把所有的音乐作品都朝某一种曲式上面去套。

§4.6 音的叠置——和弦

从音乐声学的角度讲，和弦就是不同音高的音在空间的叠置。

4.6.1 和声、和弦

一般认为，任何不止一种音高的音同时发声，就形成和声（Harmony）。三个或三个以上不同音高的音，按三度音程叠置，则构成和弦（Chord）。广义的说，三个或三个以上的音的叠置就构成和弦。最常用的和弦是三个音按三度叠置的三和弦（Triad）及四个音按三度叠置七和弦（Seventh Chord）。也还有在第四个三度音上再叠置一个三度的九和弦（Ninth Chord）以及依此类推的十一和弦、十三和弦等。

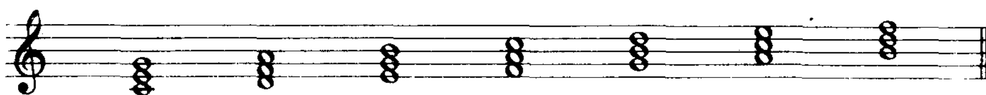
4.6.2 三和弦

1）三和弦

三个音按三度叠置构成三和弦。如：

---

* 奏鸣曲式不同于奏鸣曲（Sonata），后者是一种固定的有三或四个乐章的大型乐曲形式.



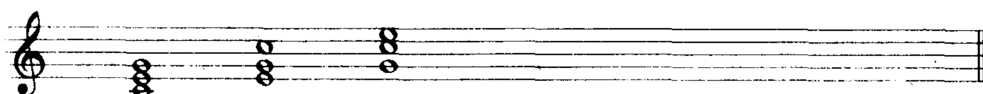
1＝C	5	6	7	1̇	2̇	3̇	4̇
	3	4	5	6	7	1̇	2̇
	1	2	3	4	5	6	7

三和弦的三个相隔为三度的音中，音高最低的音叫做根音（Root），也叫一音，顺序向上为三音（Third）和五音（Fifth）。

2）原位和弦和转位三和弦

根音为最低音的三和弦称为原位三和弦（Primary Chord）。

三和弦在使用时，有时把根音移到上面，三音最低，称为第一转位（First Inversion），也叫六和弦（Sixth Chord），因为这时和弦中最低音与最高音之间是六度。如果把根音和三音都移到上面，五音是最低音，称为第二转位（Second Inversion），也叫四六和弦（Sixfour Chord），这是因为这时和弦中最低音与上面两个音的音程分别为四度和六度。如：



1＝C	5	1̇	3̇	等
	3	5	1̇	
	1	3	5	
	原位	第一转位	第二转位	
		六和弦	四六和弦	

下面只讲几种最常用的三和弦：

3）大三和弦（Major Triad）

三和弦中，如果根音与三音之间的音程是大三度，三音与五音之间是小三度，则构成大三和弦。如：



1＝C	5	6	7	1̇	2̇	3̇	等
	3	#4	#5	6	7	#1̇	
	1	2	3	4	5	6	

一般认为，大三和弦的听感比较明亮。

4）小三和弦（Minor Triad）

三和弦中，如果根音与三音之间的音程是小三度，三音与五音之间是大三度，则构成小三和弦。如：

1＝C								
	5	6	7	1̇	2̇	3̇	#4̇	
	♭3	4	5	♭6	♭7	1̇	2̇	等。
	1	2	3	4	5	6	7	

小三和弦与大三和弦的差别只在第一和第五音与第三音的音程距离上。

一般认为，小三和弦的听感比较柔和或黯淡，不如大三和弦明亮。

5）减三和弦（Diminished Triad）

两个小三度叠置构成减三和弦。如：

1＝C								
	♭5	♭6	♭7	♭1̇	2̇	3̇	4̇	
	♭3	4	5	♭6	♭7	1̇	2̇	等。
	1	2	3	4	5	6	7	

减三和弦的听感比小三和弦更为黯淡，有不协和、不稳定感。

以上三种和弦要能够从听感上区别出来。在讲完音律以后，我们再解释这三种和弦在听感上之所以不同的声学基础。

三和弦是最基本的一种和弦，也是最重要的一种和弦，在讨论问题时，往往首先以三和弦作为基础。不讲明是几个音构成的和弦常都是指三和弦。

4.6.3 七和弦

1）七和弦

四个音按三度音叠置构成七和弦。如：

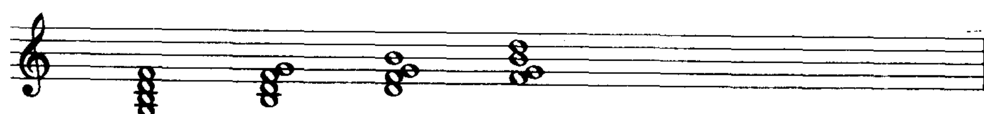
1＝C						
	7	♭7	♭7	♭♭7	♭7	
	5	5	5	♭5	5	
	3	3	♭3	♭3	3	等。
	1	1	1	1	#1	

七和弦中四个相隔为三度的音中，音高最低的听做根音，也叫一音，顺序向上为三音、五音和七音。

2）原位七和弦和转位七和弦

根音为最低音的七和弦称为原位七和弦。

七和弦也有时把根音移到上面，三音最低，称作和弦的第一转位（也叫五、六和弦（Six-five Chord））。如果把一音、三音都移到上面，称为第二转位（也叫三、四和弦（Four-three Chord））。如果把一、三、五音都移到上面，则是第三转位（也叫二和弦（Chord of the second））。如：

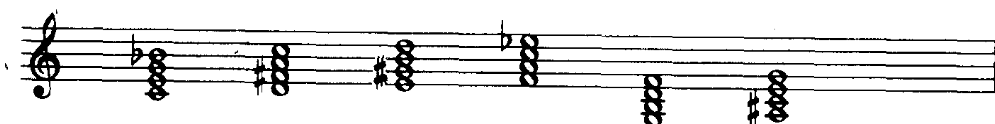


1=C	原位	第一转位（五、六和弦）	第二转位（三、四和弦）	第三转位（二 和弦）	
	4	5	7	$\dot{2}$	
	2	4	5	7	
	7	2	4	5	等。
	$\underset{\cdot}{5}$	$\underset{\cdot}{7}$	2	4	

（第一转位：7—5 六度，7—4 五度；第二转位：2—7 四度，2—4 三度；第三转位：4—5 二度）

3）大三小七和弦

一个大三和弦叠置一个小三度构成大三小七和弦。根音与七音之间是小七度。大调式属七和弦（Dominant Seventh）是大三小七和弦。如：



1=C						
♭7	$\dot{1}$	$\dot{2}$	♭$\dot{3}$	4	5	
5	6	7	$\dot{1}$	2	3	
3	#4	#5	6	7	#1	等。
1	2	3	4	$\underset{\cdot}{5}$	$\underset{\cdot}{6}$	

大三小七和弦的听感类似大三和弦，明亮但不稳定，趋向于进入上四度音上的和弦。

5）小三小七和弦

一个小三和弦上面叠置一个小三度，构成小三小七和弦。根音与七音之间也是小七度。如：

1=C						
♭7	1̇	2̇	♭3̇	4	5	
5	6	7	1̇	2	3	
♭3	4	5	♭6	♭7̣	1	等。
1	2	3	4	5̣	6̣	

小三小七和弦的听感接近小三和弦，但由于上面是一个大三和弦，所以又带有些大三和弦的感觉。自然小调式主音上的七和弦属七和弦和下属七和弦都是这种和弦。

6）减三小七和弦

一个减三和弦叠置上一个大三度构成这种小七和弦。用得最多的是：

1=C
6
4
2
7̣

这常常被当成替代属七和弦使用。

7）大七和弦

根音与七音之间大七度构成大七和弦。可以是大三和弦或小三和弦叠置一个大三度，或增三和弦加上一个小三度。如：

1=C		
7	7	7
5	5	#5
3	♭3	3
1	1	1

大七和弦中一音与七音的大七度音程（或小七度）是很不和的谐的。大七和弦在一般乐曲中用得较少，但有其特殊效果。

8）减七和弦

三个小三度叠置成为减七和弦。例如：

1＝C	♭♭7	♭2̇	♭♭3̇	
	♭5	♭7	♭1̇	
	♭3	5	♭6	等
	1	3	4	

在键盘乐器上只有三种减七和弦，即：

1＝C	♭♭7	♭7	♭1̇
	♭5	5	♭6
	♭3	3	4
	1	♯1	2

再顺序向上，有：

1＝C	1̇	即	1̇
	6		♭♭7
	♯4		♭5
	♯2		♭3

综上所述，最基本的七和弦是大三小七、小三小七和减七三种。

我们要能从听感上区分出这几种主要的七和弦。

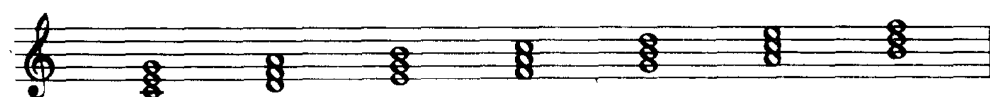
4.6.4 调式和弦

和弦的应用总是与作品的调式联系起来的。

以调式主音为根音的三和弦称为主和弦，也叫一级和弦；以属音为根音的三和弦称为属和弦，也叫五级和弦；以下属音为根音的三和弦称为下属和弦，也叫四级和弦。这三组和弦是最重要的和弦，其他以调式的第 n 音为根音的三和弦也分别称作 n 级和弦。常用罗马字母表示。写法上大三和弦常用大写，小三和弦和减三和弦常用小写。
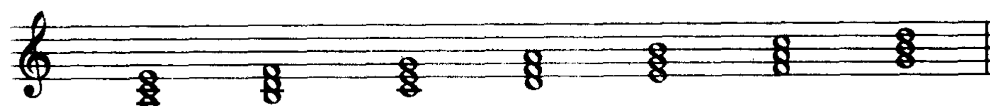
例如：

C 大调



1=C							
	5	6	7	1̇	2̇	3̇	4̇
	3	4	5	6	7	1̇	2̇
	1	2	3	4	5	6	7
	一级和弦	二极和弦	三级和弦	四级和弦	五级和弦	六级和弦	七级和弦
	主和弦			下属和弦	属和弦		
	I	II	III	IV	V	VI	VII

A 小调



1=C，6̣=A							
	3	4	5	6	7	1	2
	1	2	3	4	5	6	7
	6̣	7̣	1	2	3	4	5
	一级和弦	二级和弦	三级和弦	四级和弦	五级和弦	六级和弦	七级和弦
	主和弦			下属和弦	属和弦		
	I	II	III	IV	V	VI	VII

每种调式的主和弦、属和弦、下属和弦称为正三和弦，其余称为副三和弦。

由上述可见，自然大调式的三个正三和弦都是大三和弦，自然小调式的三个正三和弦都是小三和弦。音乐作品中，正三和弦是用得最多的，因此，也决定了音乐的“调性”。一般来说，大三和弦听感较为明亮、开放，而小三和弦极为暗淡、含蓄。

大三和弦和小三和弦的差别在于三音，因此，在和弦应用中，如果要显示调性，就不可省略三音，而导致调性（大调性或小调性）不明确。而五音有时则是可以省略的，特别是在七和弦中。如手风琴的每个和弦键都是由三个音组成的，其七和弦省略五音。

§ 4.7. 乐音的时间和空间构成——和弦的连接

一部音乐作品，如果只看乐谱，也就是说先撇开乐器音色的不同和表演，那就是不同音高的音的叠置和运动，也即是乐音在时间域和空间域里的变化和流动，集中的体现在和弦的连接上。

在讲和弦连接的规律之前，先要讲一下和弦外音。

4.7.1 和弦音、和弦外音（Inharmonic Tone）

对于一首歌曲或乐曲，要加上多声部的和弦效果，并不需要把每一个音都配上和弦，而往往把有些音不作为和弦音处理，这就是和弦外音。顾名思义，和弦音是构成和弦的音。

和弦外音可以是弱拍上的音。也可以是强拍上的音。
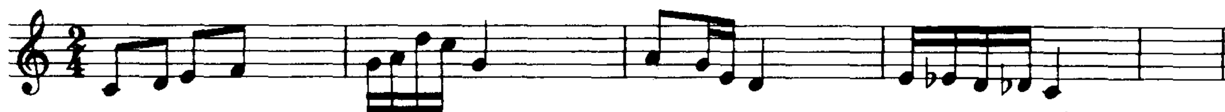
把旋律中的哪些音当作和弦音，哪些当作和弦外音，有很大的任意性。这就会导致完全不同的和声效果，也给音乐的构成以极大的变化余地。

一个音高属于不同和弦，因此可以用不同的和弦相配，也会得出不同效果。

常见的和弦外音（下例中有“＋”的是和弦外音）有：

1）经过音（Passing Note）

两个不同音高的和弦音之间的、按音的高低顺序进行（级进）中的和弦外音，称为经过音。经过音与前后和弦音之间是二度音程，在五声音阶调式中有时可以是小三度。经过音也可以有连续两个或三个。例如：
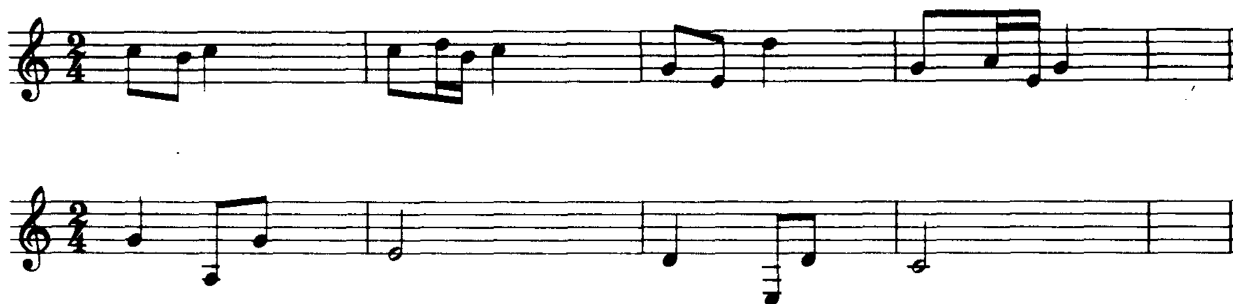


1＝C $\frac{2}{4}$ 1 2 3 4 | 5 6 $\dot{2}$ $\dot{1}$ 5 | 6 5 3 2 | 3 ♭3 2 ♭2 1 |

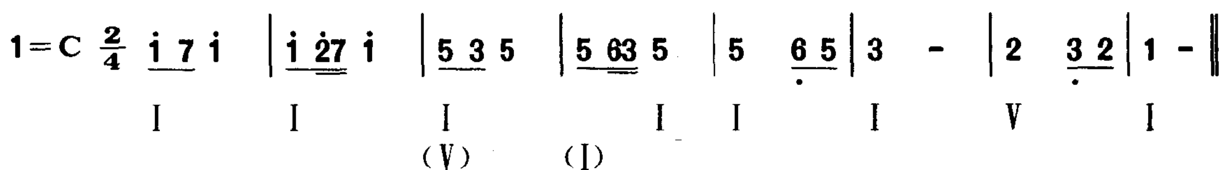
I　I（V）　II（VI）II　I

括弧中是取另一种和弦，因此和弦外音也变了。

2）助音（Auxiliary　Note）
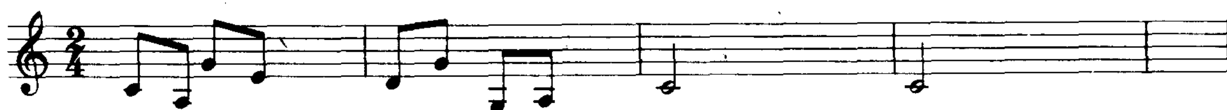
两个相同的和弦音中间插入的和弦外音叫助音。助音也可以不止一个。例如：

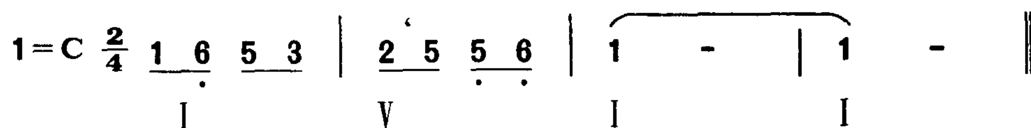




3）邻音

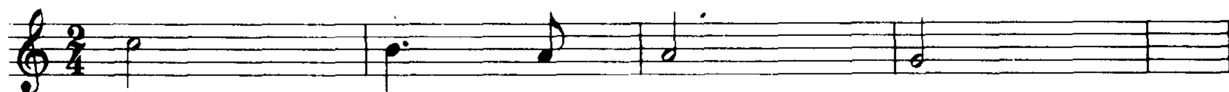
与和弦音相邻（二度，或五声音阶中的小三度）而非级进中的和弦外音，例如：

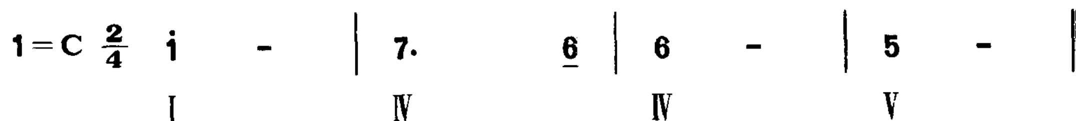




4）倚音
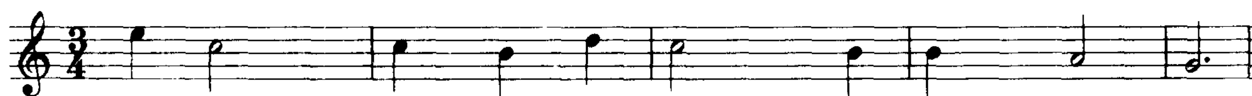
倚音是强拍上的和弦外音，有特别的不协和感。但是它紧接着出现和弦音时，就有更好的协和感。例如：

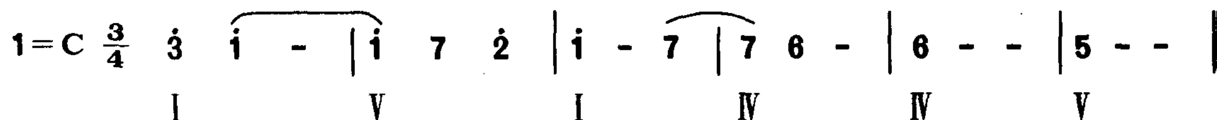




5）延留音（Suspension）
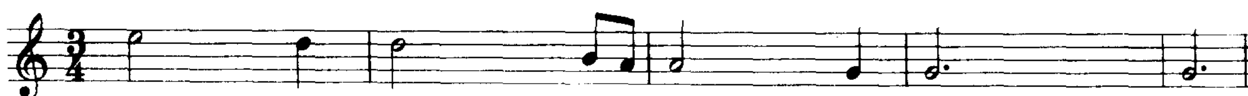
前一和弦延留到下一和弦的和弦外音称为延留音或留音。例如：

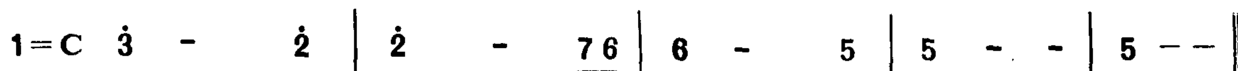




6）先现音（Anticipation）
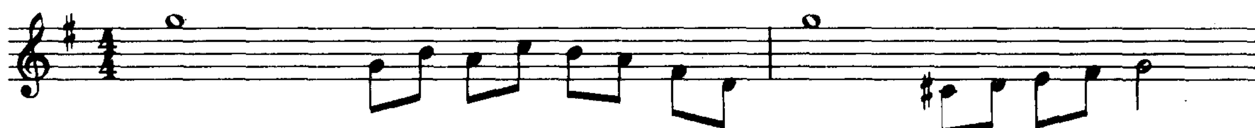
后面的和弦音在前面的和弦中物出现，这个先出现的和弦外音叫先现音。例如：

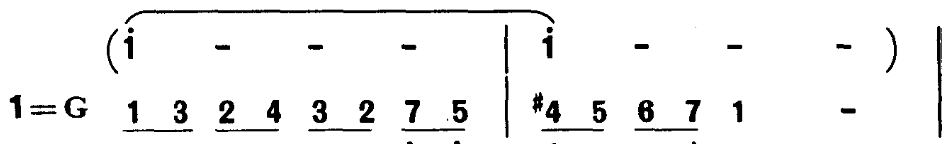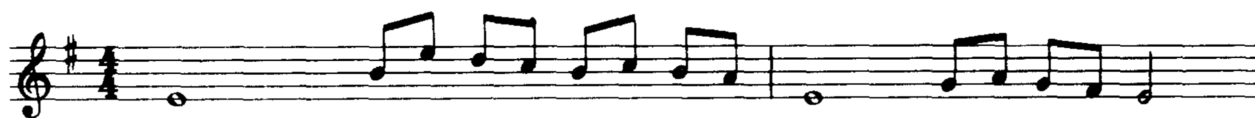




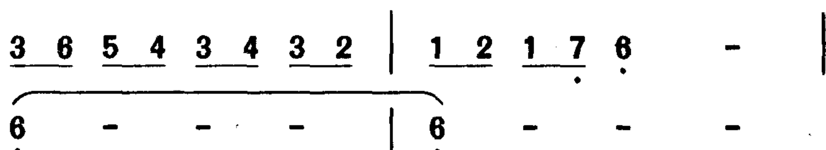
7）长音（Long Time Note）

一个长时值的音，在和弦不断变换时常处于和弦外音的地位，这种和弦外音称为长音。例如：常用的是主音和属音，大调是“do”和“sol”、小调的“la”和“mi”例如，









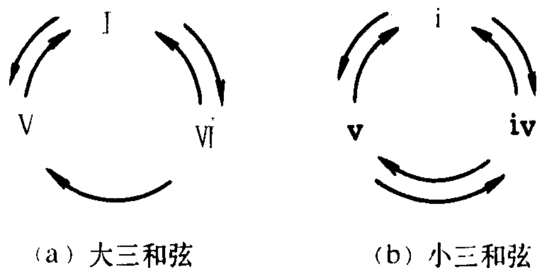
4.7.2 和弦的功能性连接

1）正三和弦的连接

最常用的和弦连接顺序是：主—属—主，即Ⅰ—Ⅴ—Ⅰ或i—v—i，主—下属—主，即Ⅰ—Ⅳ—Ⅰ或i—iv—i，主—下属—属—主，即Ⅰ—Ⅳ—Ⅴ—Ⅰ或i—iv—v—i。即不管是大调还是小调，主要是三个正三和弦这几种连接和进行。小调中的v—iv的进行也是用的。

2）正三和弦的功能

正三和弦的连接方式可以画成一圈，如下所示：



（a）大三和弦　　（b）小三和弦

图 4-6　正三和弦的功能

3）和弦的功能组

当我们用副三和弦配和声时，根据与正三和弦共有音，把三和弦分成几个功能组。

主功能组由Ⅰ、Ⅵ、Ⅲ级和弦组成，下面的叙述都用大写字母表示。因Ⅵ级和Ⅲ级和弦与Ⅰ级和弦都共有两个音。

属功能组：由Ⅴ、Ⅶ、Ⅲ级和弦组成，因四级和Ⅲ级和弦与Ⅴ级和弦都共有两个音。

下属功能组：由Ⅳ、Ⅵ、Ⅱ级和弦构成，因Ⅵ级和Ⅱ级和弦与Ⅳ级和弦都共有两个音。

一个功能组内的和弦，在许多情况下，可以相互替换，当然，如果作为结束和弦时就要考虑调性的问题了。

这样，和弦的连接方式就更多了：

Ⅰ—Ⅴ—Ⅰ的进行可以扩展成为：

Ⅰ—Ⅲ—Ⅰ，Ⅰ—Ⅴ—Ⅰ，Ⅲ—Ⅴ—Ⅰ，Ⅵ—Ⅴ—Ⅰ等等。

Ⅰ—Ⅳ—Ⅰ的进行可以扩展成为：Ⅰ—Ⅱ—Ⅰ，Ⅰ—Ⅵ—Ⅰ，Ⅱ—Ⅰ—Ⅰ；Ⅱ—Ⅳ—Ⅰ等等。

Ⅰ—Ⅳ—Ⅴ—Ⅰ的进行可以扩展成Ⅰ—Ⅱ—Ⅲ—Ⅰ，Ⅲ—Ⅵ—Ⅴ—Ⅰ，Ⅵ—Ⅱ—Ⅴ—Ⅰ等等。

§4.8　音乐的综合构成——风格和体裁

4.8.1 音乐作品的风格（Style），构成音乐作品风格的要素

1）风格是什么？

风格是什么？简单地说，风格就是个性，就是特点。在同样一类事物中，不同的风格就构成区别于他人的一种表现特点。一个作家的作品，一个演员的表演，一位老师的讲课，一个人的工作作风等等，都会有不同的风格，使人一看或一听就能感到这是谁。音乐作品当然也表现出一定的风格特点。

2）构成音乐作品风格的要素

以上所述，由音乐声的四个基本要素构成了音乐作品中的旋律、节奏、曲式、和弦、调式等等诸多高一层次的要素，最后还要加上表演这一要素。每一个作品都会由于这些要素的

不同而区别于其它，形成各自的特点和风格。现在择其主要的予以一一叙述。

3）节奏（Rhythm）

各民族、地区、时代，不同体裁的音乐有不同的特殊的节奏。如华尔兹（Waltz）是|x x x|三拍子，第一拍重，第二、三拍轻。而约翰·施特劳斯的圆舞曲的节奏是中间一拍稍微长一些，形成了他独特的风格。摇滚（Rock and Roll）音乐的基本节奏是 x x |x x|，重音在第二拍上。慢摇滚是 6/8 拍子：

x 0 x x 0 x|x 0 x x 0 x|x 0 x x 0 x|x x x x 0 x|。哈巴涅拉（Habanera 舞曲是第一拍上有符点即x. x xxx|x. x xxx|……等。

中国大秧歌的节奏是|x x 0 x x| x x 0 x 0 x x|。陕北腰鼓的一种节奏是x x x x| x x|x x|。朝鲜长鼓舞的一种节奏是x x x x x 0 x 0 x|等等。

有的乐曲，用不同的拍子演奏，风格就变了。例如：《友谊地久天长》原是 4/4 拍子的苏格兰歌曲，但在电影《魂断蓝桥》里又奏出 3/4 的拍子，有着更为深情的内涵，已广为流传。《夏日里最后的玫瑰》原是 3/4 拍子，在电影《英俊少年》中改为 4/4，唱起来变行更加有青春的气息。许多乐曲都是用改变拍子来变奏的。

4）速度

同一个曲子，改变演奏速度，会有很大差别甚至有截然不同的效果。如苏联歌曲《祖国进行曲》由男低音独唱，慢唱舒展、宽广，情深意远；由童声唱，快唱则热烈、奔放、更充满朝气。

一般进行曲（March）速度不能太慢，然而葬礼进行曲（Funeral March）则不能快奏。

5）调式

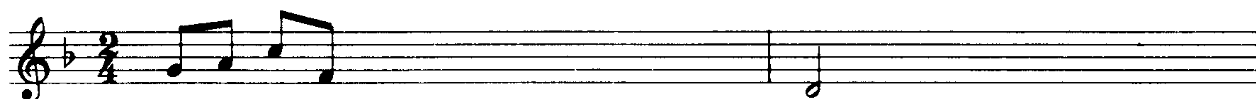
我国陕北民歌多有 sol 调式和 rei 调式，如《信天游》、《蓝花花》。蒙族的民歌有许多是 la 调式，如《嘎达梅林》、《草原上升起不落的太阳》。藏族民歌有许多是 dol 调式，如《我的家在日喀则》等。

如前所述，日本的五声音阶调式结构与我国汉族调式不同，一听就不是中国歌曲。

6）旋律（曲调）和和弦

有一些曲调中的音的排列有其特有方式。
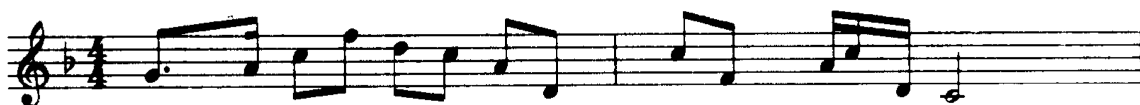
如：蒙族的曲调



1＝F 2 3 5 1 | 6 - ||
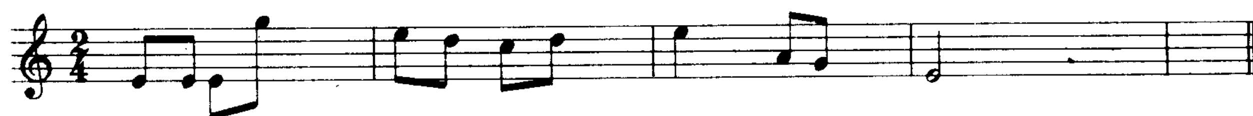
即大跳后再连续同向的进行。

还如，二人台，也有，如：



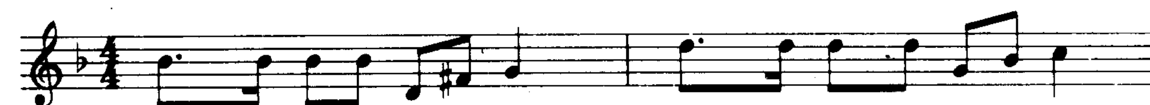
1＝F 2· 3 5 1̇ 6 5 3 6̣ | 5 1 35 6̣ 5̣ － · ‖

后一小节有大跳并继续下行。
山西的《走西口》也有大跳和类似的进行，如：



1＝C $\frac{2}{4}$ 3 3 3 5̇ | 3̇ 2̇ 1̇ 2̇ | 3̇ 6 5 | 3 － ‖

河南梆子常有：



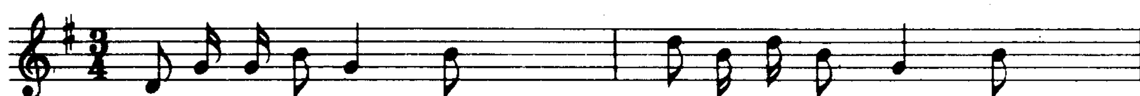
1＝C $\frac{4}{4}$ 5· 5 5 5 2 #4 5 － | 2̇· 2̇ 2̇ 2̇ 5 7 1̇ ‖

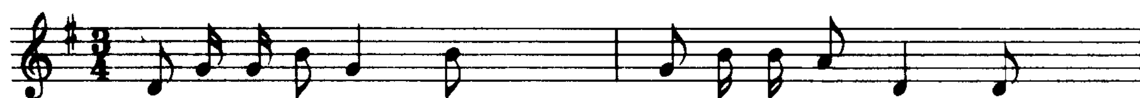
河北梆子



1＝F 1̇· 7 6 5 3 6 5 | …… | 1· 2 3 5 2 3 1 ‖
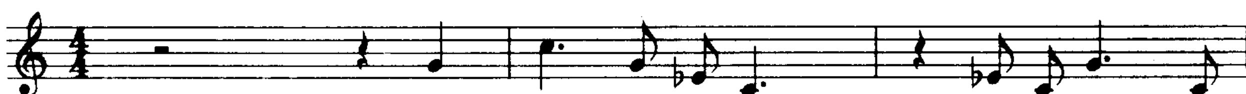
我国西南某些少数民族的曲调常在主和弦中进行，如：
彝族：

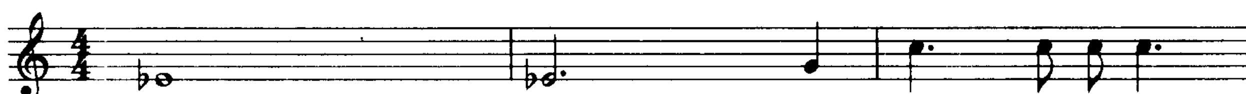


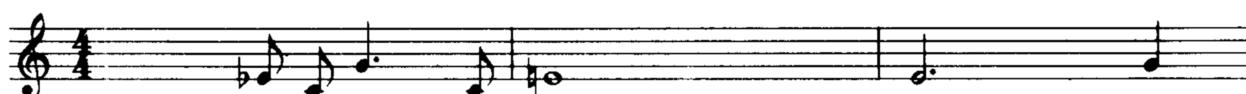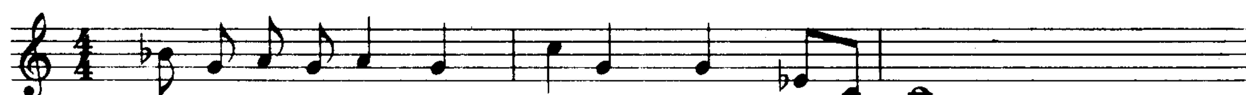


1=G $\frac{3}{4}$ 5 1 1 3 1 3 | 5 3 5 3 1 3 | 5 1 1 3 1 3 | 1 3 3 1 5 5 ‖

布鲁斯表现为大调音阶中降第三音第五音和第七音（♭3. ♭5. ♭7），例如：









1=C $\frac{4}{4}$ 5 | i. 5 ♭3 1. | 0 ♭3 1 5. 1 | ♭3 - - - | 3 - - 5 |
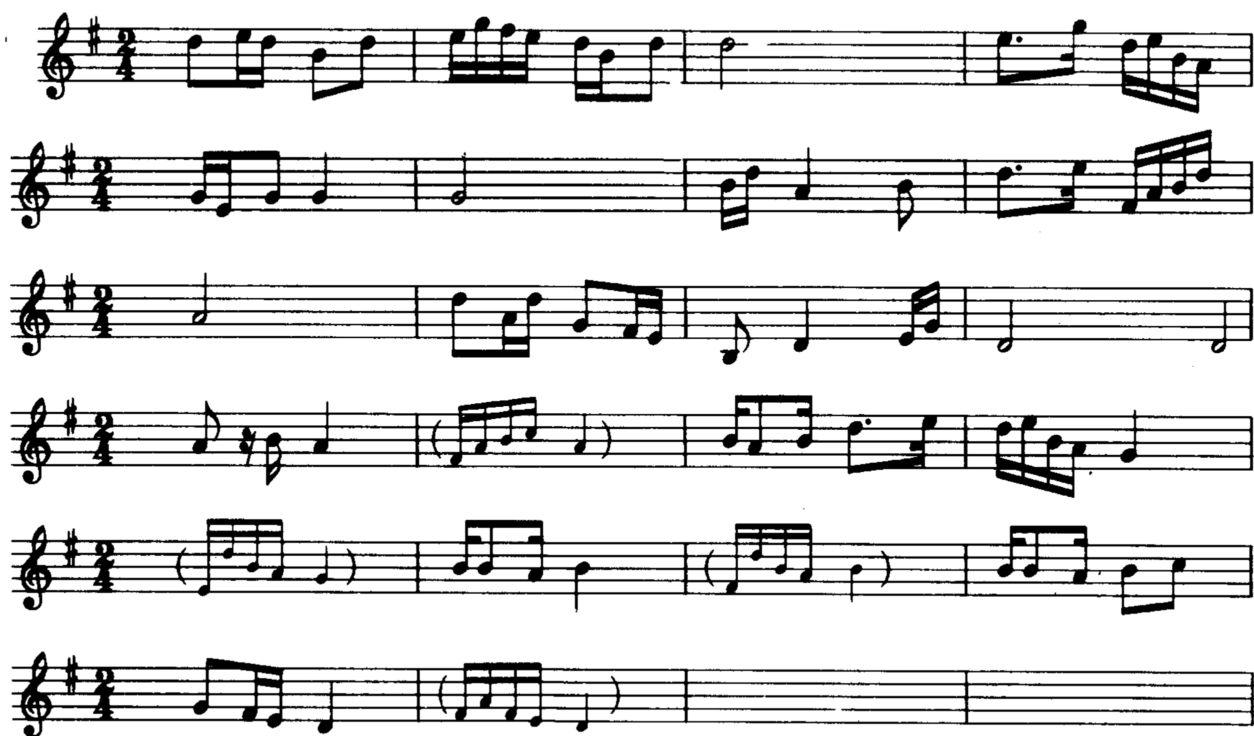
i. i i i. | 0 ♭3 1 5. 1 | ♮3 - - - | 3 - - 5 |

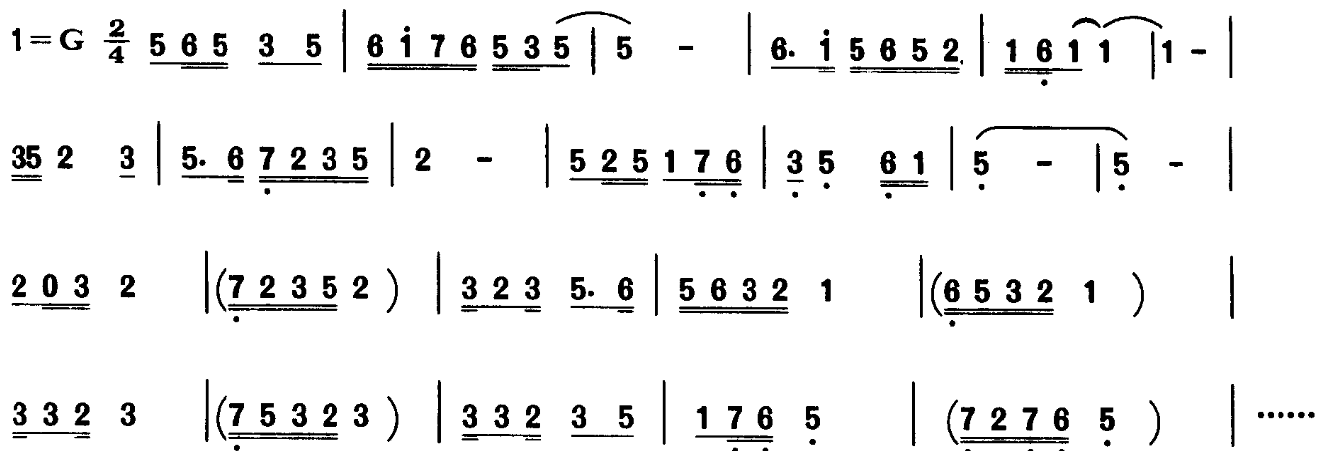
♭7 5 6 5 6 5 | i 5 5 ♭3 1 | 1 - - - ‖

7）其他

音乐中还有许许多多因素，可以构成不同的风格的特点。例如：不同的乐队组织，会有不同风格，如爵士（Jazz）乐队必须有架子鼓、萨克管、小号或还有钢琴等。现代轻音乐团或电声乐队就要有电吉他、电贝司、电子琴或合成器等。而乡村歌曲则用吉他伴奏。

我国评剧及一些河北民歌曲调中的过门、伴奏常常是从哪个音升始又落在哪个音上，或者是落在旋律的结束音上。例如：小二黑结婚中“





演奏的声强也有区别，如重金属摇滚乐要在120dB以上才算正宗。

还有如伴唱形式的不同。号子、船歌等是一个领众人和，如我国的《川江号子》，印尼的《星星索》。还有许许多多表演形式上的特点，如真假嗓、拖腔、甩腔、等等，内容极为丰富，风格颇为多样。

4.8.2 音乐作品的体裁

由音乐作品的某些风格特点集合起来形成一定的形式，即构成音乐作品的不同体裁。比如，迪斯科舞曲（Disco）的常规速度是每分钟125拍，强节奏，电声乐器演奏，歌词简单，多

遍重复，尾声常常是多重反复，弱结束。

爵士（Jazz）是十二音调式，无调性或弱调性，切分节奏，自由，即兴演奏等。

台湾校园歌曲是民族调式，通俗歌谣体，乡土气息，富于人情味。

进行曲（March）是行进速度，2/4 拍子。

加伏特（Gavotte）舞曲是四拍子，中速，中间常常插入一个长音的风笛舞曲。

小夜曲（Serenade）则是一种优美流畅，旋律富于表现力的情歌。

诙谐曲（Scherzo）是节奏活泼，速度快，三拍子，常作为大型乐曲中第三乐章出现。

小步舞曲（Minuet）是一种法国的土风舞，三拍子，三段曲体，常作为第三乐章出现。三段体的中段常用三声部写成。

阿勒曼德（Allemade）舞曲是德国民间舞曲，中速，四拍子，起拍是短音符，等等。

思考题：

1. 写下以下几组音每两个音之间的音程：

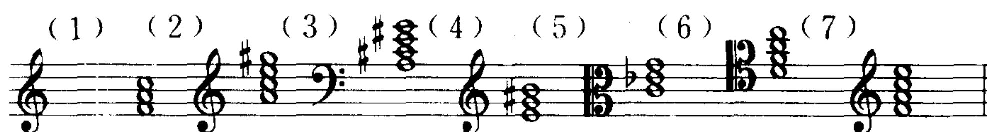
(1) b^1—f^2　　(2) $^{b}e^2$—$^{b}a^1$

(3) f^3—$^{b}a^3$　　(4) f^1—e^2

(5) G—f　　(6) $^{\#}c^1$—a^1

2. 举出大调式、小调式以及我国汉族五声音阶调式的歌曲或乐曲各一首。

3. 以下几组和弦是哪种和弦？



(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	#$\dot{5}$	#5			6	$\dot{3}$
6	$\dot{3}$	3	#7	5	4	$\dot{1}$
4	$\dot{1}$	#1	5	♭3	2	6
2	6	$\underset{\cdot}{6}$	3	1	$\underset{\cdot}{7}$	4

4. 记下你自己在一般状态下和最佳状态下歌唱的音域，最高音是指能持续一定时间的音。如果一首歌曲在简谱上记的音域是 $\underset{\cdot}{5}$—$\underset{\cdot}{1}$，对你来说，选用哪个调来唱比较合适？

5. 随便找一首歌，分析一下它的旋律进行中哪些是和弦音？属于哪级和弦？哪些是和弦外音？是哪种和弦外音？

6. 你家乡或地区的民歌在调式、旋律、节奏、和弦等方面有哪些特点？

7. 记下小提琴、吉他或你所熟悉的乐器的空弦的音名。

8. 举出一些不同体裁的音乐的特点。

9、怎样从音乐声构成的角度来理解音乐。

10、你喜欢或熟悉用五线谱还是简谱？固定唱名法还是首调唱法，为什么？是怎样形成的？

参考资料：

1. 黄虎威：《和声写作基本知识》，人民音乐出版社，1987年版。
2. 龚镇雄：《歌曲手风琴伴奏的编配》，人民音乐出版社，1984年版。
3. 王沛纶：《音乐辞典》，文艺书屋。

第五章　音律概述

§5.1　引言

5.1.1　音律问题的内容

我们一涉及音乐，就遇到一系列问题，如：乐器制作，或调整乐器的音高，以便进行乐器齐奏，或多人合唱，需要有一个共同的音高标准。即同一种乐器中的不同个体之间，不同种乐器之间，各个人唱出的歌声，都需要有同样的音高。不能是这支笛子与另一支笛子吹出来的同名音是不相同的，笛子与二胡同样的音，音高却又不相同，这样就乱套了。因此当一出现乐器制作和合奏（首先是齐奏）时，音律学（Temperament）实际上就格外显得重要了。

音高，即听觉上音的高低，有没有一个客观的标准呢？如果有，又是怎样定下来的呢？

音阶中的各个音之间是按什么关系排列的？有了基准音以后，音阶中的各个音又有没有一定的音高？

音阶中的各个音是怎样产生的？怎样由一个音引出另一个音？不同方法产生的同名音有什么不同？差别多大？在实用中产生的矛盾又如何解决？

一个八度内有多少个音为合适？我国历史上曾有过两个音（即小三度F,^{b}A），三个音（按现代唱名是$\underset{\cdot}{5}$，$\underset{\cdot}{6}$，1或$\underset{\cdot}{6}$，3，5或$\underset{\cdot}{6}$，1，2）四个音（宫，角，徵，羽），五个音（宫，商，角，徵，羽）。六个音，七个音，…十二个音，十四个音，十八个音，二十四个音，四十一个音，六十个音，五百二十个音，六百个音等。外国除了五个，七个，十二个音以外，还有十七个（波斯，阿拉伯），十九个（意大利），二十二个（印度），三十七个（日本），五十三个音（英国）等。近来不少人主张把一个八度分成二十四个音。还有，这些音平均分还是不平均分？平均是按等差还是按等比分？等等。

进一步的一个有趣的问题是，为什么不论是中国还是外国，许多文明国家中最普遍流行的是十二律和五声音阶及七声音阶？这个问题又如何解释？

两个或几个音之间的和谐或不和谐，与音的产生或组合方式有什么关系？有没有客观依据？主观与客观又如何统一？

一般人和专业的音乐工作者对于相对音高差的分辨能力有多大？这与音律学的研究及与之有关的乐器的制作，乐队定音、调弦的要求有何关系？……

以上这些都涉及音律学的理论和实践问题。本章中只对音律理论作一扼要的介绍，但已经包括了音律学的主要内容。关于音律问题与主观听觉的关系，我们已经在第三章中作过一些介绍。

5.1.2　我国古代关于音律起源的记载

我国古代早有关于音律起源的记载。《吕氏春秋》（约公元前二三五年）《正乐篇》载有："昔黄帝命泠伦截竹为十二律。泠伦自大夏之西，乃之阮椧（今之昆仑）之阴，取竹于嶰溪之谷，以生空厚匀者，截两节间，共长三寸九分，而吹之，以为黄钟之宫，吹曰少舍（音名，隋

书作“舍少”)。次制十二，以之阮榆之下，听凤凰之鸣，其雄者为六，雌者为六，以比黄钟之宫，适合。黄钟之宫皆可以生之，故曰，黄钟之宫，律吕之本”。这段话说明，我国很早就知道要制定一个音律的标准，而且描述了怎样制订，用什么材料和尺寸，叫什么名称？并说明了它的普遍性。

清朝的李文勇考证了这段话，从黄钟到应钟的十二律，管长差基本是等距的，只是稍作一些调整，尺寸如下：

律名	黄钟	大吕	太簇	夹钟	姑洗	仲吕	蕤宾	林钟	夷则	南吕	无射	应钟
管长（寸）	8.1	7.6	7.2	6.8	6.4	6.0	5.7	5.4	5.1	4.8	4.5	4.2
相邻两管管长差（寸）	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

汉朝司马迁的《史记 · 律历志》中亦有：“黄帝使羲和占日，常仪占月，臾区占星气，泠沦造律吕，大楧作甲子，隸首作算数”。其中也记载了泠沦造律吕。律吕是乐律的泛称，古人以律为阳，以吕为阴，阴阳相间，六律六吕。把律吕与日，月，星，纪年，算数同列，足见其被重视的程度。

音律的律，就是规矩、标准的意思。我国的甲骨文中的“律”“作”“ ”，后来演变成“聿”，还是手持竹管的形象。

黄钟管不仅作为音律的基准，还是我国最初度、量、衡的基础。《汉书 · 律历志》中记有：“度量衡出于黄钟之律也。度者本起于黄钟之管，量者本起于黄钟之化，权（衡）者本起于黄钟之重”。即是把黄钟管的管长作为一尺，把黄钟管的容积作为一合（古十合为一升），十升为一斗，十斗为一石)；黄钟管中可盛纳的黍的重量即可盛1200粒黍，重十二铢（古二十四铢为一 ）作为权的基准。

§5.2 音与律，音高标准

5.2.1 音与律，律制

音与律有共同点，也有差异。由各种调式产生各种音阶，音阶中的每一个单位称作一个音。规定音阶中各个音的由来及其精确音高的数学方法叫做“律制”。律制中的每一个单位称做“律”。

同一音阶，例如由音名为C、D、E、F、G、A、B、组成的七声音阶，可能由不同的生律方法产生，如用十二平均律、五度相生律或纯律的生律方法产生。用不同的律制生律，同名音的音高可能是不同的。

粗略的说，音是定性的或不太严格定量的，而律是严格定量的。

5.2.2 标准音高（Standard Pitch）

既然用不同律制生律，各同名音的音高可能不同，因此，很自然需要有一个作为基准的音。给这个音的音高确定一个客观的定值以后，再来按不同生律方法确定音阶中其它各音的

音高。

各个国家在各个时期的标准音及其音高都不同。我国古代常以第一律黄钟为准，但各个时期黄钟的音高是不同的，如晚周的黄钟音高约为 693.5Hz，这是以周尺九寸（约合 25.3cm）作为管长，三分（约合 0.8cm）作为管径，作成的开管所发的音，约相当于现代的 f^2（698.46Hz）比 f^2 低 13 音分（音分的含意及计算方法见下述）。其它时期黄钟高度约在 $^{\#}c^1$ 至 a^1 之间。

日本曾以姑洗宫（512.9Hz）作为标准音高。十七世纪至十八世纪中叶欧洲古典音高定 a^1 =415～432Hz。亨德尔（Handel，1685-1759）曾定 a^1=416Hz。海顿（Haydn，1732-1859）和莫扎特（Mozart，1756-1791）曾定 a^1=422Hz。1834 年德国斯图加特地方物理学家聚会，把 a^1 定为 440Hz，称第一国际音高，也叫斯图加特音高（Stuttgart Pitch）。1859 年法国巴黎的"音乐家与物理学家委员会"定 a^1=435Hz，也叫法国音高（French Pitch）。当时与会的有奥柏（Auber，1782-1871）、阿列维（Haleuy，1799-1862）、柏辽兹（Berlioz，1803-1869）、罗西尼（Rossini，1792，1868）等。这一音高又被称为第二国际音高或巴黎音高（Paris Pitch）。

1939 年 5 月，在英国伦敦召开了国际会议，又恢复以第一国际音高 a^1=440Hz 为国际标准音高，也叫做演奏会音高，(Concert Pitch)。现在全世界的音乐及乐器都以此作为共用的基准音高。英国的 BBC（不列颠广播公司），美国的 ABS（国家计量局）每天向全世界广播 a^1= 440Hz 的标准音高。

还有一种物理音高(Physical Pitch)(也叫理论音高，Phylosophial Pitch)，即以 c^1=256Hz 为准生律。由 c^1 生出 a^1=426.67Hz。而以 a^1=440Hz 为准· 用十二平均律生律得出 c^1= 261.63Hz。物理音高目前已逐渐被淘汰而统一到 a^1=440Hz 上去。

对于乐器的标准音高，历史上多有变化。即使是已经有了标准音高 a^1=440Hz 以后，不少音乐家还有自己的标准。总的来说作为标准的 a^1 音的频率是不断升高的：1611 年英国伍斯特大教堂的管风琴定为 360Hz；1740 年亨德尔演奏《救世主》时定为 422.5Hz；1780 年莫扎特曾定为 421.6Hz；1822 年巴黎 歌剧院用 431Hz；1898 年，法国标准是 435Hz；1880 年，纽约斯坦威钢琴定为 457Hz；十九世纪，有不断把标准音提高的趋势，甚至到达 460Hz 左右；1939 年，重定国际标准音高是 440.00Hz。现代指挥家定的 a^1 频率是：卡拉扬指挥的柏林爱乐乐团是 448Hz；罗斯特波维奇指挥的苏联国家交响乐团用 440Hz；小泽征尔指挥的美国波士顿交响乐团用 442Hz；朱宾·梅塔指挥的纽约爱乐乐团用 442Hz 等。许多钢琴家、指挥家都故意把音调得高些，以使琴声更加明亮、铿锵。

在乐队演奏时，常常以某一种乐器为标准对音。我国古代就有"堂上之乐皆受笙均，堂下之乐皆受磬均。"即：堂上的乐器要随笙定音，堂下的乐器要随磬定音。到现今为止，民族乐队中常常以笙做定音乐器。因为它的发声是一簧一管，由簧管共同决定音高，比较稳定。在西洋管弦乐队或管乐队中，常常以双簧管作为定音乐器。因为它的音高是较固定的，由簧片起振而由管长发音，不像铜管乐器那样音高随口形、吹气的力度或角度而变；而弦乐器则更不宜作为定音乐器了。

对于用 A=440.00Hz 作为乐队定音的标准音，现在还有争议，特别对铜管乐，觉得不合适，有人建议用 F 为标准音。

5.2.3 中国古代律名

黄钟，大吕，太簇，夹钟……等是中国古代律名也是音名。古人常以"黄钟、大吕"代

表音乐，六律、六吕，共十二律。

下面列出中国古代十二律的律名（假定以黄钟为现代音名的 f）和以黄钟为“宫”的五声音阶及七声音阶的阶名以及对应的唱名。

注意有几个字的读音不是通常的发音。

中国五声音阶调式的唱名除了“1、2、3、5、6、$\dot{1}$”外，也可以唱成“5、6、7、$\dot{2}$、$\dot{3}$、$\dot{5}$”或“4、5、6、$\dot{1}$、$\dot{2}$、$\dot{4}$”，这也还是宫调式。

由于“变徵”“变宫”的存在，中国汉族七声音阶调式是“4、5、6、7、$\dot{1}$、$\dot{2}$、$\dot{3}$、$\dot{4}$”而不是’1、2、3、4、5、6、7、$\dot{1}$”，调式主音在“林钟”即属音上。

十二律名	黄钟	大吕	太簇(cou)	夹钟	姑洗(xian)	仲吕	蕤(rui)宾	林钟	夷则	南吕	无射(yi)	应钟	清黄钟
现代音名	f	#f	g	#g	a	#a	b	c^1	$\#c^1$	d^1	$\#d^1$	e^1	f^1
五声音阶	宫(1)		商(2)		角(3)			徵(5)		羽(6)			清宫($\dot{1}$)
七声音阶	宫(4)		商(5)		角(6)		变徵(7)	徵($\dot{1}$)		羽($\dot{2}$)		变宫($\dot{3}$)	清宫($\dot{4}$)

高八度记作清或半，即弦长减半，音高则清。

低八度记作浊或倍，即弦长加倍，音低则浊。

§ 5.3 频率比，音分（Cent）

前面我们已经提到过，音程是描述两个音的音高之间的距离，在音乐上可以用“度”来表示，或用半音、全音来表示；在音乐声学上，音程还可用频率比或音分来表示。

5.3.1 频率比与音程

我们先从一个实际存在的实验事实出发，这是实验科学的通用的立论依据，也是理论的最初出发点。这就是：

音程每高八度，发声体的振动频率增高为两倍。也即 $a^1=440$Hz，$a^2=880.00$Hz，$a=220.00$Hz 等等。对应于实际情况，弦的长度或管的长度每缩短一半，频率就是原先的两倍，这样我们就把音程与频率比联系起来了。

5.3.2 音分

用半音或全音表示音程其最小单位是半音，这个间距太大了，在键盘乐器上暂就定了，在弦乐和管乐演奏上已经感到不够，而在乐器制造、音律学研究及音乐声学的其他方面的研究上，就理更不够了。

于是，我们把一个八度音程按等比分成 1200 份，每份叫做一音分。两个频率为 f^2. f^1 的音之间的音程以音分数表示为：

$$音分数=1200\lg_2\frac{f_2}{f_1} \qquad (5.1)$$

这就是计算音分的基本公式。使用这个公式可以算出各种所需的结果来。

例 1，两个音的音高相差一音分，其频率比为多少？

解：

$$1=1200\lg_2\frac{f_2}{f_1}$$

即，

$$\frac{1}{1200}=\lg_2\frac{f_2}{f_1}\ ,\quad 得\frac{f_2}{f_1}=2^{\frac{1}{1200}}=1.00057779$$

即相差约为万分之六。

例 2，两个音相差 100 音分，问其频率比是多少？

解：

$$100=1200\lg_2\frac{f_2}{f_1}$$

即，

$$\frac{100}{1200}=\frac{1}{12}=\lg_2\frac{f_2}{f_1}\ ,\quad 得\frac{f_2}{f_1}=2^{\frac{1}{12}}=1.059463094$$

例 3，求比 a^1 低 14 音分的音的频率。已知 a^1 的频率 $f_{a^1}=440.00Hz$

解：

$$14=1200\lg_2\frac{f_{a^1}}{f}\ ,$$

f 比 f_{a^1} 低，放在分母上，使 f_{a^1}/f 为正，

即，

$$\frac{f_{a^1}}{f}=2^{\frac{14}{1200}}=1.0081195\ ,\quad 得\ f=436.46Hz。$$

在计算中，如果只有乘除法运算或一般对数、指数运算，有效数字位数的取法可能大体是：以参与运算的有效数字最少的数为准，在运算过程中可多保留一位。(如用计算机或计算器进行运算，可任其自动保留位数，但不得低于上述标准)，最后取数一般以有效数字最少的位数取齐，但常数或标准值不在此列。如上例中，我们计算频率，一般取五位，在运算过程中出现 $\frac{f_{a^1}}{f}=1.00812$ 取六位，最后得 f=436.46Hz 取五位，与 f_{a^1} 相同。其中 1200 是常数，14 音分是我们提出来的准确值，可以看作 14.000…，因此，也不考虑其位数。

公式 (5.1) 是一个非常有实用意义的基本公式，它的出发点是把频率比为 2：1 的八度音程定义为 1200 音分，即：如果 f_2 与 f_1 的频率比是 2 ($\frac{f_2}{f_1}=2$)，则有

$$1200\lg_2\frac{f_2}{f_1}=1200\lg_2{}^2=1200\quad 音分。$$

除此及其中包含的等比关系之外，再也没有其它条件了。

用这个公式除了可以从两个音的频率比求出它们的音分差，而且如果已知一个音的频率就可以求出与之相差（高或低）任何音分的频率了。于是我们可以从 $f_{a^1}=440.00Hz$ 出发，得出各种律制，各个音之间相差为 1 音分的音的频率，*‘排列成表。现在有出售的“音分、频率对照表”，就是根据这个公式算出来的。

在计算中，音分差有正、有负，即所求的音比标准（已知）音高，则音分差为正；所求的音比标准音低，则音分差为负，上例 3 可写为：

$$-14=1200\lg_2\frac{f}{f_{a^1}}$$

有

$$\frac{f}{f_{a^1}}=2^{-\frac{14}{1200}}=0.991946\ ,\quad 得\ f=436.46Hz。$$

即可以一律写成 f/f_0；把待定频率写在分子上。f_0 是已知频率。

§ 5.4 十二平均律

5.4.1 十二平均律（Twelve Tone Equal Temperament）

一个八度音程（频率比为 2）按等比数列均分十二份，得十二律，称为十二平均律。当没有注明是几平均律时（例如六平均律，十四平均律），通常平均律（Equal Temperameut）就是指十二平均律。

根据十二平均律的定义：

$$(\sqrt[12]{2})(\sqrt[12]{2})(\sqrt[12]{2})\cdots\cdots(\text{自乘十二次})=2 \quad ,$$

因此，十二平均律各相邻两音之间的频率比为：

$$\frac{f_2}{f_1}=\sqrt[12]{2}=1.059463094 \qquad (5.2)$$

我国明代朱载堉（1536-1611）在世界上首先系统地提出了十二平均律，比德国人威克迈斯特（Werckmeister，1645-1706）还要早。

十二平均律每相邻两律（钢琴上差半音）之间相差的音分数为：

$$1200\lg_2\sqrt[12]{2}=1200\lg_2 2^{\frac{1}{12}}=\frac{1200}{12}\lg_2 2=100$$

即 100 音分。

因此，按十二平均律，每相邻两音之间的音程都是 100 音分。这个结果表明，频率比是等比关系，音分差是等差关系。这是根据公式（5.1）而来的，也表示了对数与真数之间的关系。

5.4.2 十二平均律的生律方法

我们可以从 $f_{a^1}=440.00$Hz 出发，用十二平均律的生律方法找出任何音的频率。

方法 1：

以 $f_{a^1}=440.00$Hz 为准，每差半音（钢琴上相邻的键）乘或除（求比 f_{a^1} 高的用乘，低的用除）$\sqrt[12]{2}$ 即得另一个音的频率。例如：

求钢琴上 c^1 的频率。

c^1 比 a^1 低，a^1 下方的第九键为 c^1，于是有

$$f_{c^1}=f_{a^1}/(\sqrt[12]{2})^9=440.00/2^{\frac{9}{12}}=261.6255654=261.63\text{Hz}$$

如果要求 c^2；则取 $c^1=261.63$Hz；$f_{c^2}=f_{c^1}\times 2=523.25$Hz 把 f_{c^1} 作为运算过程中的量，多保留一位。不然，如果用 $f_{c^2}=261.63\times 2$ 得 $f_{c^2}=523.26$Hz，$f_{c^3}=1046.52$Hz 而不是 1046.50Hz；$f_{c^4}=2093.04$Hz 而不是 2093.01Hz；$f_{c^5}=4186.08$Hz，而不是 4186.02Hz。

这时乘式除 $(\sqrt[12]{2})^m$，就是用了十二平均律的生律方法。

从已知的十二平均律中的任一音出发，也可以求得其它的音的频率。

方法 2：

---

* 严格说来，公式（5.1）只能用于平均律。但在说明其他律制与平均律的差别时，或者在说明其他律制两个音之间的音程时，也常常借用音分亦即公式（5.1）

** 如果认真计算，还应多留一位，有 $f_{c^4}=2093.00$Hz，$f_{c^5}=4186.01$Hz。

以 f_{c^1} 为准，十二平均律中每差半音（Semitone）钢琴上相邻的键），其音分差为 100，用公式（5.1）求 f_{c^1} 的频率，c^1 与 a^1 之间相隔为 9 个键，即差 900 音分，根据公式（5.1）有：

$$900=1200\lg_2\frac{f_{a^1}}{f_{c^1}}，或 -900=1200\alpha g_2\frac{f_{c^1}}{f_{a^1}}，$$

得 $\frac{f_{a^1}}{f_{c^1}}=2^{\frac{900}{1200}}=1.681792$，或 $\frac{f_{c^1}}{f_{a^1}}=2^{\frac{900}{1200}}=0.5946036$

都得 $f_{c^1}=261.63\text{Hz}$。

我们再来看一下公式（5.1）。公式（5.1）实际上是一种 1200 平均律。它把八度音程按等比分成 1200 律，每一律即是一音分。

十二平均律也是按等比分的，因此，它与公式（5.1）的关系是兼容的，即十二平均律的每相邻两律（半音）之间，又按等比均分 100 份，即 100 音分。因此，公式（5.1）是针对平均律而言的。

这样，根据定义及前所述，两个音音高差 1 音分，频率比是 1.00057779：1。由这个关系，我们可以用类似上述十二平均律从一个音的频率 f 求另一音的频率 f_x 的方法 1 来求结果：

$$即\quad f_x=f\cdot 2^{\frac{x}{1200}} \tag{5.2}$$

如 5.2.3 中例 3，亦可以用下法求得，即低 14 音分为除以 $(\sqrt[1200]{2})^{14}$，即得：

$$f_x=440.00/(\sqrt[1200]{2})^{14}=440.00/1.00812=436.46\text{Hz}$$

我们把从 c^1 到 c^2，按十二平均律的生律方法，以 $a^1=440.00\text{Hz}$ 为准，得出的自然音阶各律（音）的频率与 c^1 的频率比，与 c^1 的音程以音分表示，列出如下，从 c^1 开始计算：

律名	c^1	$^\#c^1={}^bd^1$	d^1	$^\#d^1={}^be^1$	e^1	f^1	$^\#f^1={}^bg^1$	g^1	$^\#g^1={}^ba^1$	a^1	$^\#a^1={}^bb^1$	b^1	c^2
与 c^1 的频率比	1	$(\sqrt[12]{2})^1$	$(\sqrt[12]{2})^2$	$(\sqrt[12]{2})^3$	$(\sqrt[12]{2})^4$	$(\sqrt[12]{2})^5$	$(\sqrt[12]{2})^6$	$(\sqrt[12]{2})^7$	$(\sqrt[12]{2})^8$	$(\sqrt[12]{2})^9$	$(\sqrt[12]{2})^{10}$	$(\sqrt[12]{2})^{11}$	$(\sqrt[12]{2})^{12}=2$
与 c^1 之间的音程(音分)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
频率 (Hz)	261.63	277.18	293.66	311.13	329.63	349.23	369.99	392.00	415.30	440.00	466.16	493.88	523.25

如果要求各其他组音的频率，可按倍、半关系简单的推算。但需注意上表中的音的频率数字在最后一位上已经四舍五入了，要求其它各组音的音高，计算时还需要多保留一至二位数字。表中所列 c^1, a^1, e^1……等音名在这里同样是律名。$^\#c^1={}^bd^1$，$^\#d^1={}^be^1$，$^\#f^1={}^bg^1$，$^\#g={}^ba^1$，$^\#a^1={}^bb^1$，只对十二平均律是正确的；与 c^1 的频率比依次为每高半音乘上一个 $\sqrt[12]{2}$，亦即相邻两个律音高差（差半音）的频率比是 $\sqrt[12]{2}$；各音的频率可以从 $a^1=440.00\text{Hz}$ 出发，也可以从任何已知音的频率出发求得。

5.4.3 小结

现在，让我们把有关十二平均律的主要内容小结一下，归纳成为几点：

1）十二平均律，是把一个八度之内按频率的等比关系等分成十二律，即十二个半音，相邻两律即半音之间的频率比为$\sqrt[12]{2}$：1。

2）从任何一音开始，比之高半音的音，其频率是此音的频率乘$\sqrt[12]{2}=1.05946$，比它低半音的者，其频率是此音的频率乘$1/\sqrt[12]{2}=0.943874$，余此类推，可以得出所有各律的频率。

3）从任何音开始，连续上生十二个半音或下生十二个半音，又得到起始音（高八度或低八度）。

4）十二平均律的每半音之间的距离是100音分，即$1200\lg_2\frac{f_2}{f_1}=1200\lg_2(\sqrt[12]{2})=100$。

5）音分也是按频率的等 比关系分的，因此，只有平均律才能用音分来计算。

6）用以表示平均律与其它各种律制的差别常用音分，因此，平均律是通常用作参考标准的。这也是本书不像其他讲音律学的著作那样先讲五度相生律和纯律，而先讲十二平均律的原因。

7）在十二平均律中$^\#$C=$^\flat$D，$^\#$D=$^\flat$E，$^\#$F=$^\flat$G，$^\#$A=$^\flat$B，重升C=D，重升D=E，重升E=$^\#$F，重升F=G，……，重降C=$^\flat$D，重降D=C，重降E=D，……，增二度等于小三度，增四度等于减五度，……，平均律中的增减音程只是形式上的。

8）十二平均律是当前最通用的一种律制，凡是现代键盘乐器，或以键盘乐器伴奏，或与键盘乐器协奏、合奏的音乐演奏，或是带“品”的乐器，都是用十二平均律。

§5.5　五度相生律

5.5.1　五度相生律

与平均律相比，五度相生律是一种非平均律。即音阶中各音之间的音高关系不是平均的，或说是相邻音之间的频率比或音分差不一样。古希腊的毕特哥拉斯发明的“五度循环定律”(Circle of Fifthes)，即从某一律开始，每上推五度（纯五度）产生一个新律，然后作八度移动，移入一个八度之内，我国早于毕特哥拉斯200-500年，就已有“五度相生法”，“三分损一”、“三分益一”的“三分损益法”，“上生下生法”，“隔八相生法”隔八律生下一律等等。古阿拉伯也有这样五度相生的律制。

5.5.2　五度相生律的生律方法：三倍频

五度相生律的生律方法是从一律开始，每隔一个纯五度（上行纯五度或下行纯五度）产生一律。

音程为纯五度的两音的频率比是3。上行纯五度是三倍频，下行纯五度是三分之一倍频，即高一律与低一律的纯五度关系都是三倍频。

生律时，要把新的律纳入同一个八度之内，因此，要把频率增大为二倍或四倍或减小为一半或为四分之一，或者说要升高或降低一个或两个八度音。把频率加倍或减半（或再加倍或再减半），这也就是所谓的“倍半相生”。倍半相生还不仅仅适用于“五度相生”律。

如果C以开始，按三倍频生律，五度相生律的生律次序依次为：

生律次数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
生律顺序	C→	G→	D→	A→	E→	B→	#F→	#C→	#G→	#D→	#A→	#E→	#B

#B≠C，即“十二旋宫”“旋”不到起始的“宫”音。

如果从c开始，按1/3倍频，五度相生律的生律次序依次为：

生律次数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
生律顺序	C→	F→	♭B→	♭E→	♭A→	♭D→	♭G→	♭C→	♭F→	♭♭B→	♭♭E→	♭♭A→	♭♭D

重降♭♭D≠C，同样，也是十二次生律不能回复到起始音。

让我们以自然大音阶和自然小音阶中的各音为例，具体来推算一下各音的频率，然后，再由频率比（用十二平均律方法）来推算一下音分值，与从十二平均律生律方法得出的同名音比较一下。我们把各音移到一个八度之内，亦即把频率比移到1与2之间。因此，要除以2或4，或乘以2或4。

从C开始，以它的频率作为1，用3倍频生下一律：

C→G：$1\times3\times\frac{1}{2}=\frac{3}{2}$。先乘3，即三倍频。必须除以2，才能移到一个八度之内。所以G与C的频率比为$1\times3\times\frac{1}{2}=\frac{3}{2}$。

G→D：$\frac{3}{2}\times3\times\frac{1}{4}=\frac{8}{9}$。从G开始，即从$\frac{3}{2}$开始，3倍频是乘3，再移到八度内，要除以4，即与C的频率比为$\frac{3}{2}\times3\times\frac{1}{4}=\frac{9}{8}$。

D→A：从D出发，即从9/8出发，有$\frac{9}{8}\times3\times\frac{1}{2}=\frac{27}{16}$。依次有：

C→G→D→A→E→B→……　。

$1\times3\times\frac{1}{2}=\frac{3}{2}$，$\frac{3}{2}\times3\times\frac{1}{4}=\frac{9}{8}$，$\frac{9}{8}\times3\times\frac{1}{2}=\frac{27}{16}$，$\frac{27}{16}\times3\times\frac{1}{4}=\frac{81}{64}$，$\frac{81}{64}\times3\times\frac{1}{2}=\frac{243}{128}$，……还可依此计算下去。

从C出发，以它的频率作为1，用1/3倍频生律：

C→F：$1\times\frac{1}{3}=\frac{1}{3}$还必须乘以4，才能移到一个八度之内。所以F与C的频率比为$\frac{1}{3}\times4=\frac{4}{3}$。

依此生得：♭B→♭E→♭A→♭D→♭G…

$$\frac{4}{3}\times\frac{1}{3}\times4=\frac{16}{9},\quad \frac{16}{9}\times\frac{1}{3}\times2=\frac{32}{27},\quad \frac{32}{27}\times\frac{1}{3}\times4=\frac{128}{81}\cdots\cdots$$

还可依此计算下去。

5.5.3　左拳定调方法

现在介绍一种寻找与五线谱上升、降记号个数对应的定调的方法。伸出左拳如图5-1，从左至右，每一个指关节凸、凹都以某一音名定义，从C开始到B为止。自开始数，如是一个

升号，则向右连同自身顺序数到第五个算一次，即为：C→D→E→F→G 是为 G 调。如是两个升号，则数两次，即从 G 开始数到头 B 以后，再从 C 开始向右数到第五个，即 G→A→B→C→D，为 D 调，余此类推。降号则逆向数，即向左数。如一个降号为：C→B→A→G→F，为 F 调。两个降号为：F→E→D→C→B 为♭B 调等等。

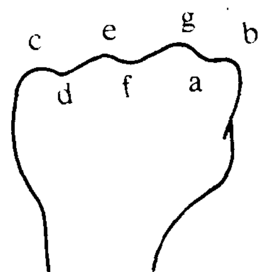


图 5-1 左拳定调法

实际上，对十二平均律，即钢琴上的调名也可以是这样数的。每向上数 5 个，相当于五度相生上生一次，每向下数 5 个，相当于五度相生下生一次。

5.5.4 我国古代记载的三分损益法计算

我国古代的五度相生方法，明确记载为由黄钟（C）生林钟（G），林钟生太簇（D），太簇生南吕（A），南吕生姑洗（E），姑洗生应钟（B），应钟生蕤宾（♯F），蕤宾大吕（♯C），大吕生夷则（♯G），夷则生夹钟（♯D），夹钟生无射（♯A），无射生仲吕（♯E），仲吕生执始（比黄钟高），近似黄钟，但有差别。具体数字如下：

黄钟（9 寸）$\xrightarrow[9\times\frac{2}{3}=6]{\text{损}}$ 林钟（6 寸）$\xrightarrow[6\times\frac{4}{3}=8]{\text{益}}$ 太簇（8 寸）

$\xrightarrow[8\times\frac{2}{3}=5.33^{+}]{\text{损}}$ 南吕（5 寸 3 分小分 3 强）$\xrightarrow[5.33\times\frac{4}{3}=7.11^{+}]{\text{益}}$ 姑洗（7 寸 1 分小分 1 微强）

$\xrightarrow[7.11\times\frac{2}{3}=4.74^{+}]{\text{损}}$ 应钟（4 寸 7 分小分 4 微强）$\xrightarrow[4.74\times\frac{4}{3}=6.32^{+}]{\text{益}}$ 蕤宾（6 寸 3 分小分 2 微强）

$\xrightarrow[6.32\times\frac{4}{3}=8.43]{\text{益}}$ 大吕（8 寸 4 分小分 3 弱）$\xrightarrow[8.43\times\frac{2}{3}=5.62]{\text{损}}$ 夷则（5 寸 6 分小分 2 弱）

$\xrightarrow[5.62\times\frac{4}{3}=7.49^{+}]{\text{益}}$ 夹钟（7 寸 4 分小分 9 强）$\xrightarrow[7.49\times\frac{2}{3}=4.99^{+}]{\text{损}}$ 无射（4 寸 9 分小分 9 强）

$\xrightarrow[4.99\times\frac{4}{3}=6.66]{\text{益}}$ 仲吕（6 寸 6 分小分 6 弱）$\xrightarrow[6.66\times\frac{4}{3}=8.88]{\text{益}}$ 执始（8 寸 8 分小分 8 弱）。

可见执始比黄钟短约 0.12 寸，以黄钟（C）与太簇（D）之间为一个全音计，相差为约 1/8～1/9 个音。

5.5.5 五度相生律自然大音阶

现在把从 c^1 开始由五度相生方法生律的自然大音阶中的各律（音）列出如下，同时列出各音与 c^1 的频率比和音程，以及相邻两音的音分差和频率比。括弧里的音分是取整数值，由于音分本身已经是一很小的单位，在一般讨论中，我们就不再去取小数了。只是在研究工作中，通常还要多留一位数。

律名	c^1	d^1	e^1	f^1	g^1	a^1	b^1	c^2
生律次数（从开始三倍频数）	0	2	4	-1(*	1	3	5	
与 c^1 之间频率比	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{81}{64}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{27}{16}$	$\frac{243}{128}$	2
与 c^1 的音程（度）	同	大二	大三	纯四	纯五	大六	大七	八
与 c^1 的音程（音分）$1200\lg_2\frac{f_2}{f_1}$	0	203.91 (204)	407.82 (408)	498.04 (498)	701.96 (702)	905.86 (906)	1109.78 (1110)	1200 (1200)
相邻两音的音分差		204	204	90	204	204	204	90
相邻两音的频率比		$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{256}{243}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{256}{243}$
以 c^1 为 261.6256Hz 算出的频率	261.626	294.33	331.12	348.83	392.44	441.49	496.68	523.25

注：相邻两音的音分差一栏数字对应上两栏，如：204 对应 c^1，d^1，以下类同。

我们也可以用 $a^1=440$Hz 为准，算出五度相生律自然大音阶的各音的频率。实际上，只需把各音除一个 441.49/440.00=1.003386 就可以了。

5.5.6 五度相生律大音阶各音之间的音程，最大音差（Comma Maxima），大全音（Major Tone），小半音（Limma Semitone）

五度相生律大音阶的大二度，大三度，纯四度，纯五度，大六度，大七度和八度音程如上表所述。可以看出，每上行五度生律即 3 倍频一次，比十二平均律高两音分；每下行五度生律即 1/3 倍频一次，比十二平均律少两音分。

如果是连续五度上生 12 次或连续五度下生 12 次，则会与起始音有 24 音分之差，即 $^{\#}$B 比 C 高 24 音分，^{bb}D 比 C 低 24 音分。同样 $^{\#}$F 与 ^{b}G 之间，$^{\#}$D 与 ^{b}E 之间，$^{\#}$C 与 ^{b}D 之间……也差 24 音分。因为无论从哪一律开始得到他们，上生五度和下生五度次数之和都是 12 次。进一步讲，从任何一律开始，增四度与减五度之间，增二度与小三度之间……都是 24 音分，这 24 音分称为五度相生律最大音差。

从上表中也可以看出，五度相生律的大二度（全音）是 204 音分，这是因为 D 是由五度上生两次（大九度向下移八度即为大二度）而来的，这称为五度相生律大全音或称大全音，其

* “—”号为三分之一音频。下同。

** 实际上，$1200\lg_2\frac{3}{2}$，即每五度上升一次比平均律高 1.955 音分≈2 音分。如果生律次多了，把 1.955 以 2 来近似会有累计误差，如 1.955×12=23.46 音分。

频率比是$\frac{9}{8}$。在纯律里也有这种全音。

五度相生律的 E 与 F 之间是 90 音分，称小半音，其频率比是$\frac{235}{243}$，这是因为 E 是五度上生 4 次，F 是五度下生 I 次所得的其间相差五度相生 5 次，因此比十二平均律的 100 音分差 10 音分。

5.5.7 五度相生律自然小音阶及各音之间的音程

下面，我们列出从 c^1 开始，用五度相生方法生律得到的自然小音阶，同时列出与 c^1 的频率比，相邻两音的音分差和频率比。音分差也取整数值。以 C 小调为例：

律名	c^1	d^1	$^b e^1$	f^1	g^1	$^b a^1$	$^b b^1$	c^2
生律 （次数） 从 c^1 开始 3 倍 频或 1/3 倍频（－）	0	2	－3	－1	1	－4	－2	
与 c^1 的频率比	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{32}{27}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{128}{81}$	$\frac{16}{9}$	2
与 c^1 之间的音程（度）	同	大二	小三	纯四	纯五	小六	小七	八
与 c^1 之间的音程 $1200\lg_2 f/f_c{}^1$（音分）	0	203.91 (204)	294.13 (294)	498.04 (498)	701.96 (702)	792.18 (792)	996.09 (996)	1200 (1200)
相邻两音的音分差		204	90	204	204	90	204	204
相邻两音频率比 f/f_1 ($f>f_1$)		$\frac{9}{8}$	$\frac{256}{243}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{256}{243}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$
以 c^1 为 261.6256Hz 算出的频率（Hz）	261.6256	294.33	310.07	348.83	392.44	413.43	465.11	523.25

注：相邻两音的音分差一栏数字对应上两栏，如：204 对应 c^1，d^1 以下类同。

也可以用 a^1＝440.00Hz 算出五度相生律小音阶各音的频率。

与五度相生律自然大音阶不同，五度相生律自然小音阶的小三度、小六度和小七度几个音程，分别是 294 音分，792 音分和 996 音分，如上表所列。这是由于从 c 开始，$^b e$ 是五度下生三次，$^b a$ 是五度下生 4 次，$^b b$ 是五度下生两次，因此，由前可知，它们各比十二平均律少 6 音分、8 音分和 4 音分。

这里 d 与 $^b e$ 之间差五度相生 5 次，g 与 $^b a$ 之间也是差五度相生 5 次，因此，它们之间也是一个小半音。

5.5.8 五度相生律和声小音阶及其特殊音程，大半音

下面，我们还讲一下五度相生律和声小音阶及其特殊的音程。也从开始，如前列出如下：

律名	c^1	d^1	$^{\flat}e^1$	f^1	g^1	$^{\flat}a^1$	b^1	c^2
生律顺序（次数）	0	2	−3	−1	1	−4	5	
与 c^1 的频率比 f/fc^1	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{32}{27}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{128}{81}$	$\frac{243}{128}$	2
与 c^1 之间的音程（度）	同	大二	小三	纯四	纯五	小六	大七	八
与 c^1 之间的音程（音分）	0	204	294	498	702	792	1110	1200
相邻两音的音分差（音分）	204	90	204	204	90	318	90	
相邻两音的频率比	$\frac{9}{8}$	$\frac{256}{243}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{256}{243}$	$\frac{19683}{16384}$	$\frac{256}{243}$	

注：相邻两音的音分差一栏数字对应上两栏，如：204 对应 c^1，d^1 以下类同。

在五度相生律的和声小音阶中，出现第六音与第七音之间（这里从 c^1 开始是 $^{\flat}a^1$ 与 b^1 之间）的增二度音程，是 318 音分。增二度与小三度（c^1～$^{\flat}e^1$ 为 294 音分）之间差 24 音分，也是一个最大音差。

增二度与大二度之间为 318-204＝114 音分，这叫做五度相生律大半音。实际上，从 c^1 五度上生 7 次得 $^{\#}c^1$，$^{\#}c^1$ 与 c^1 之间差 114 音分也是一个大半音。从 a^1 五度下生七次得 $^{\flat}d^1$，$^{\flat}d^1$ 与 d^1 之间差（114 音分）也是一个大个半音。

5.5.9 小结

现在，让我们把有关五度相生律的最主要的内容小结一下，归纳成为几点。这里，我们再强调并提醒一下，表示音程有几种方法，即：全音和半音，“度”，频率比和音分。

1）五度相生律的生律方法也叫三分损益法或隔八相生法，是上行纯五度即 3 倍频，或下行纯五度即 1/3 倍频，然后移到同一个八度即同一音高组之内，这需要把频率加倍或减半，或再加倍或再减半，即乘以 2 或 4，或除以 2 或 4。

2）任何一个音，都可以作为生律的起始音，亦即第一律或调式主音。

3）如果从 c（无升降音）开始，每五度上行生律一次，与五线谱上增加一个升号（#）相对应；每五度下行生律一次，与五线谱上增加一个降号（b）相对应。即从 c 上行五度得 g，与五线谱上一个升号是 G 调对应；上行两次得 d，与五线谱上两个升号的 D 调对应；从 c 下行五度得 f，与五线谱上 F 调对应；下行两个五度是 $^{\flat}b$ 音，与两个降号的 $^{\flat}B$ 调对应，余此类推。

4）与十二平均律相比，五度相生律每上生律一次，比平均律高两音分，每下行五度生律一次，比平均律减少两音分。

5）五度相生律大全音是 204 音分，因为从 c 至 d 是五度上生两次的结果。

6）五度相生连续上行五度，生律 12 次，如 c→g→d→…→${}^{\#}$b；或连续下行五度生律 12 次，如 c→f→^{b}b→…→重降 d，不能回到原起始音，即${}^{\#}$b 不等于 c，重降 d 不等于 c，两音相差 24 音分，称为五度相生律最大音差；其频率比是 $(\frac{3}{2})^{12}/12^{7}=\frac{531441}{524288}$，为一个全音的 1/8.5 ≈1/9。

7）同样${}^{\#}$c≠^{b}d 差 24 音分，${}^{\#}$d＝^{b}e，……，都差 24 音分。因为，这些都是从任一律开始，上行 n 次五度生律和下行 12-n 次五义生律所得的结果。

8）五度相生律的半音有大半音与小半音之分，大半音如 c－${}^{\#}$c，它们的频率比是 $(\frac{3}{2})^{7}/2^{4}=\frac{2187}{2048}$，它们之间的音分为 114 音分。小半音如 c－^{b}d，它们的频率比是 $2\times(\frac{2}{3})^{5}=\frac{256}{243}$，它们之间的音分为 90 音分；大半音与小半音之差是 24 音分，即一个最大音差。从生律次数也可以看出，是五度上生七次和下生五次之差。

9）五度相生律中，凡同名音间的半音是大半音，即 114 音分。如 c 与${}^{\#}$c，${}^{\#}$c 与重升 c，d 与^{b}d，^{b}d 与重降 d 之间等。这与 c 五度上生 7 次得${}^{\#}$c，${}^{\#}$c 再五度上生 7 次得^{x}c（重升 c），d 五度下生 7 次得重降^{b}d，^{b}d 再五度下生七次得重降 d 对应。即${}^{\#}$c 比 c 高 14 音分……^{b}d 比 d 低 14 音分。

10）非同名音之间的半音是小半音，即 90 音分。如以 c 为准，d 比 c 高 204 音分；^{b}d 比 d 低 114 音分，则^{b}d 比 c 高 204－114＝90 音分。即 c 与^{b}d 之间是 90 音分，是一个小半音。

11）五度相生律大小半音之间也是差一个最大音差，即 114－90＝24 音分。这可以用${}^{\#}$c 与^{b}d 之间的差别来说明，也可以从任何音开始生律来说明。

12）重升 c 与 d 之间是一个最大音差，即 228－204＝24 音分，重降 d 与 c 之间也是一个最大音差，即 204－114－114＝-24 音分，"－"号表示重降 d 比 c 低。余此类推。

13）增二度与小三度之音也是一个最大音差。如 c 的上行增二度是 204＋114＝318 音分，小三度即 c 到^{b}e，是 294 音分，318－294＝24 音分。

14）同样一个音，在五度相生律中有不同音高。如${}^{\#}$f 是 C 调的（升 fa），从 c 算起是 612 音分。如作为^{b}g，则从 c 算起是 588 音分（612－24＝588）或（720（g）－114＝588）。如作为^{x}e（重升 mi），则从 c 算起是 636 音分（408（e）＋228＝636 或 612＋24＝636）。如作为（重降^{b}a）则是 564 音分（792（^{b}a）－228＝564 或 588－24＝564）。因此，在不同的调里，用不同大、小或增、减音程时，是非常复杂的。

15）现在把五度相生律各音，包括升降音及部分重升、重降音的关系列出如下：从 c 开始起算：

音名		c								d						e			f	
			${}^{\#}$b	xb_b			${}^{\#}$c	x_b			x_c			${}^{\#}$d				x_d		${}^{\#}$e
	^{bb}d				${}^{bb}b_b$	^{b}d			^{bb}e			^{bb}f	^{b}e		${}^{bb}b_g$	^{b}f		^{bb}g		
从 c 算起的音程（音分）		0								204						408			498	
			24	48			114	138			228			318				432		522
	－24				60	90			180			270	294		360	384		474		

音名	$^{bb}b_a$	^{b}g	$^{\#}f$	^{x}e	g	^{x}f	$^{bb}b_b$	^{b}a	$^{\#}g$	^{bb}b	a	^{x}g	^{bb}c	^{b}b	$^{\#}a$	$^{bb}b_c$	^{b}c	b	x_a
从 C 算起的方程（音分）	564	588	612	636	702	726	768	792	816	882	906	930	972	996	1020	1062	1086	1110	1134

由此可见，在五度相生律中，对于十二平均律是同一个音的，各不同音名的升、降半音（如 $c^{\#}$与^{b}d）之间有最大音差（24 音分）存在。

至于它们之间的频率关系或者频率比数值是很容易算出的，我们就不去进一步表述了。

16）以上我们讨论的都是从 c 开始生律和以 c 作为标准音得出的各音的频率。从任何音开始生律，各音之间的频率比或者音分差是不变的，即 g 总比 c 高 702 音分，即上生五度！但是绝对的频率却变了。

17）五度相生律在历史上是最早出现、最早使用的一种律制。现在，除了少数人，如一部分弦乐器演奏家外，实际应用不太广泛。

§5.6 纯律

5.6.1 纯律

纯律（Pure Temperament）也是一种非平均律，它是基于使音阶中各音之间的频率有尽量小的整数比而产生的。纯律曾经在我国古代某些场合和在西方一段时期里被使用过。到现今为止，已经较少使用，但也还在一些场合下，如在无伴奏合唱中，为要求得各声部之间尽可能的协和，会自然的趋于纯律。

我国古琴的琴徽标有$\frac{5}{6}$、$\frac{4}{5}$……，如图 5-2 可能是一种纯律的表示，对此还有争议。

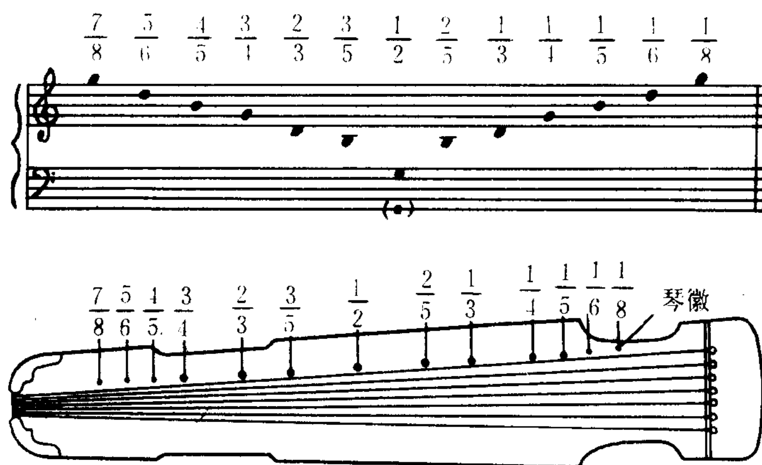


图 5-2 中国古琴

5.6.2 纯律的生律方法：三倍频和五倍频

纯律的生律方法是，除了三倍频（含1/3倍频）以外，再加上五倍频（含$\frac{1}{5}$倍频）。就是以上这两点，不用再加其它的附加设定了。即：从c开始生g、d、f用的是三倍频，在纯律大音阶中e、a、b是c、f、g的五倍频（即上方大三度音）。在纯律自然小音阶中，♭b、♭a、♭e是d、c、g的1/5倍频，（即下方大三度音）。纯律的和声小音阶再另作讨论。

纯律大音阶从c开始的生律顺序是：

$$c\xrightarrow[1\times3\times\frac{1}{2}=\frac{3}{2}]{3\text{倍频}}g\quad\xrightarrow[\frac{3}{2}\times3\times\frac{1}{4}=\frac{9}{8}]{3\text{倍频}}d\quad,$$

$$c\xrightarrow[1\times\frac{1}{3}\times4=\frac{4}{3}]{\frac{1}{3}\text{倍频}}f\quad,$$

$$c\xrightarrow[1\times5\times\frac{1}{4}=\frac{5}{4}]{5\text{倍频}}e\quad,$$

$$f\xrightarrow[\frac{4}{3}\times5\times\frac{1}{4}=\frac{5}{3}]{5\text{倍频}}a\quad,$$

$$g\xrightarrow[\frac{3}{2}\times5\times\frac{1}{4}=\frac{15}{8}]{5\text{倍频}}b\quad,$$

纯律小音阶的生律方法如下，也是从c开始，除了c→g→d或c→f以外，还有：

$$c\xrightarrow[1\times\frac{1}{5}\times8=\frac{8}{5}]{\frac{1}{5}\text{倍频}}{}^{\flat}a\quad,$$

$$d\xrightarrow[\frac{9}{8}\times\frac{1}{5}\times8=\frac{9}{5}]{\frac{1}{5}\text{倍频}}{}^{\flat}b\quad,$$

$$g\xrightarrow[\frac{3}{2}\times\frac{1}{5}\times4=\frac{6}{5}]{\frac{1}{5}\text{倍频}}{}^{\flat}e\quad,$$

这里，不必再设定一个小三度音程的频率比是6/5*

从任何一音开始，都可以按第5、第2音是第1、第5音的三倍频，第4音是第1音的1/3倍频，以及第3、6、7音是第1、4、5音的五倍频，构成纯律自然大音阶；按第5、2·4音同上所谓说是三倍频及1/3倍频，第3、6、7音是第5、1、2音的1/5倍频，构成纯律自然小音阶。可以选音阶中任一音为起始音或标准音。

5.6.3 纯律自然大音阶，普通音差

下面列出从c开始生律的纯律自然大音阶的一些数据

由上表可知，每上升一个五倍频，构成纯律大三度，其音程是386音分，比十二平均律

* 实际上，如果一纯五度的频率比是3/2，纯律大三度的频率比是5/4，则由纯五度是大三度加小三度，可得纯律小三度的频率比是6/5。这样，虽然没有多一个设定，也多了一重推论，不如直接由五倍频和1/5倍频讲更直观些。当然，对于比较熟悉数学或推理的人来说，结论是很显然的。

低 14 音分。纯律小三度即为纯五度与大三度之差，为 702－386＝316 音分。e^1 与 f^1 之间（498－386 音分），b^1 与 c^2 之间（1200-1088 音分）为 112 音分，叫做纯律大半音。纯律大三度与大全音之间差为 386－204＝182 音分，称为纯律小全音（Minor Tone）。由一个大全音和一个纯律小全音构成一个纯律大三度，即 204＋182＝386 音分。由一个大全音和纯律大半音构成纯律小三度，即 204＋112＝316 音分。（d^1 与 f^1 之间的一种小三度为 498－204＝294 音分，比 316 音分小 22 音分。于是有时把 d^1 降低 22 音分（$\bar{d}_1$），以求得纯律小三度为 316 音分）这个问题不再深讲。）

	c^1	d^1	e^1	f^1	g^1	a^1	b^1	c^2
生律顺序（次数）	0	3 倍（2）	5 倍（1）	3 倍（−1）*	3 倍（1）	f^1 5 倍（1）	g^1 5 倍（1）	
与 c^1 的频率比 f/fc^1	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2
与 c^1 的音程（度）	同度	大二度	纯律大三度	纯四度	纯五度	纯律大二度	纯律大七度	八度
与 c^1 的音程（音分）	0	204	386	498	702	884	1088	1200
相邻两音的音分差		204	182	112	204	182	204	112
相邻两音的频率比		$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{256}{243}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{256}{243}$

大全音与纯律小全音之间相差为 204-182＝22 音分，称为一个普通音差（Common Comma）。

与五度相生律相比，纯律大音阶中 e、a、b 三个音都比五度相生律低 22 音分，e：（408－386＝22，a：906－884＝22，b：1100－1088＝22）即一个普通音差，这是由上生五度 4 次（加 8 音分）与上生三度一次（减 14 音分）合起来的结果（＋8－（－14）＝22）。

纯律大半音（112 音分）与五度相生律小半音（90 音分）之间也差一个普通音差（112－90＝22），可见，普通音差是由纯律与五度相生律间的差别而来的。

在纯律中，大三和弦各音之间（c^1：e^1：g^1，f^1：a^1：c^2，g^1：b^1：d^2）有简单的频率比为 4：5：6：，小三和弦三个音（e^1：g^1：b^1，a^1：c^2：e^2，d^2：f^1：a^1）的频率比为 10：12：15。

5.6.4 纯律自然小音阶及和声小音阶

现在把从 c^1 开始的纯律自然小音阶及和声小音阶的一些数据列出如下，用括弧中（）取代即为和声小音阶。

律名	c^1	d^1	$^be^1$	f^1	g^1	$^ba^1$	$^bb^1$	(b^1)	c^2
生律方法	0	$c^1$3 倍频 2 次	$g^1$1/5 倍频	$c^2$1/3 倍频	$c^1$3 倍频	$c^2$1/5 倍频	$d^2$1/5 倍频	（$g^1$5 倍频）	$c^1$2 倍频
与 c^1 频率比（f/fc^1）	1	9/8	6/5	4/3	3/2	8/5	9/5	(15/8)	2
与 c^1 间音程（度）	同度	大二度	小三度	纯四度	纯五度	小六度	小七度	（大七度）	八度
与 c^1 间音分差	0	204	316	498	702	814	1018	(1088)	1200
相邻两音的音分差		204	112	182	204	112	204	(274)	182 (112)
相邻两音的频率比		9/8	16/15	10/9	9/8	16/15	9/8	(75/64)	10/9 (16/15)

在纯律自然小音阶中，也出现大全音，纯律小全音和纯律大半音。

每 5 倍频一次，比十二平均律少 14 音分。

在和声小音阶中，出现$^{b}a^1$与b^1之间的增二度（274 音分），这是因为纯律的b^1比平均律少了 12 音分，而$^{b}a^1$又多了 14 音分，合起来相差共 26 音分(* （300－274＝26）比纯律小三度小 20 音分（294－274＝20）

增二度与大全音（在二度）之间是 275－204＝71 音分，称为纯律小半音。

5.6.5 小结

我们也把有关纯律的主要点归纳一下：

1）纯律追求的是各音的频率比为小整数，以得到最协和的效果。

2）纯律的生律方法是三倍频（含$\frac{1}{3}$倍频）和五倍频（含$\frac{1}{5}$倍频），即纯五度和大三度。

3）纯律的纯五度是由五度相生而生律的，其频率比是 3/2；纯律的大三度的频率比是 5/4。因此，纯律的小三度的频率比是 6/5。因此得出，也可以用小三度生律。

4）生律时，每上生一个纯五度加 2 音分，每下生一个纯五度减 2 音分。每上生一个大三度减 14 音分（13.69 音分），每下生一个大三度加 14 音分。每上生一个小三度加 16 音分，每下生一个小三度减 16 音分。

5）纯律大半音分为 112 音分，频率比为 16/15；纯律小半音为 71 音分，频率比是 25/24；纯律小全音为 182 音分，频率比为 10/9；大全音为 204 音分，频率比为 9/8。大全音也用在五度相生律中。

6）纯律中的大半音和小全音总是相邻相间的，所以只有一种大三度（386 音分），而大半音与大全音或小全音似乎可构成不同音程的小三度（c^1与$^{b}e^1$频率比 6/5，316 音分；d^1与f^1频率比 32/27，294 音分）（＊我们规定 316 音分是纯律小三度。

7）由于纯律中有两种生律主法，即三倍频和五倍频，而且有上生和下生，还有增减音程，另外，对于各个调，每一个音在音阶中的位置也不同。因此，一个纯律八度中的各种律就非常复杂了。例如：在c^1与d^1之间的半音，从c^1起算，有以从c^1五度生律上生 t 次的$^{\#}c^1$（114 音分，$(\frac{3}{2})^7/2^4=\frac{2187}{2048}$）；作为 C 调的一个升降音，也可以是从 c 五度下生五次的$^{b}d^1$（90 音分，$(\frac{2}{3})^5\times 2^3=\frac{256}{243}$）；可以是从纯律大音阶第六音上生大三度的$^{\#}c^1$（71 音分，$c^1\to f^1\to a^1\to {}^{\#}c^1$，$4/3\times 5\times 5/2^3=\frac{25}{24}$）；有从$f^1$下生大三度（112 音分，$c^1\to f^1\to {}^{\#}c^1\frac{4}{3}\times\frac{1}{5}\times 2^2=\frac{16}{15}$）；可以由 $d\to {}^{\#}f\to {}^{\#}c$，（92 音分，$\frac{9}{8}\times 5\times 3/16=\frac{135}{128}$）；如果由纯律小音阶的$^{b}b^1\to f^1\to {}^{b}d^1$（133 音分，$\frac{9}{5}\times 3\times\frac{1}{5}=\frac{27}{25}$）。不同在于用不同方法及从哪个音开始生律。

8）如果不以c^1为准，而以a^1为准，则a^1在不同调中，用不同生律方法，从不同音开始

---

* b^1 与$^{b}a^1$ 的频率比是 75/64，音程为 274.58≈275 音分，表上的 1088－814 应为 1088.27－813.68＝274.59＝275 音分。讨论中由于音分取整值，所以有时用 274 音分。

** 这个问题前面已提到过，即把d^1变为$\bar{d}^1$，减 22 音分，这样$\bar{d}^1$与f^1之间也是 316 音分。

生律，与其它音的关系是不同的，问题就更复杂了。

§5.7 三种律制的比较

现在把十二平均律，五度相生律和纯律三种律的差别列出如下，以作比较。首先是各音音高的差别，然后看各个音组成和弦的差别。

5.7.1 自然大音阶

三种律制的自然大音阶各律的音高与之间的音程（以音分表示）列出如下：（以 c^1 为准。括弧内是以 a^1 为准。）

律名	c^1	d^1	e^1	f^1	g^1	a^1	b^1	c^2
十二平均律	0	200	400	500	700	900	1100	1200
五度相生律	0 (-6)	204 (198)	408 (402)	498 (492)	702 (696)	906 (900)	1110 (1104)	1200 1194
纯律	0 (16)	204 (220)	386 (402)	498 (514)	702 (718)	884 (900)	1088 (1104)	1200 (1216)

由上表可见：

1）五度相生律大音阶与十二平均律大音阶各音间相差最大的音是 b，偏高 10 音分（以 a^1 为准相差最大为 f 音，偏低 8 音分）

2）纯律大音阶与十二平均律大音阶各音之间相差最多的是 a，偏低 16 音分。e，a，b，三个音都偏低较大（以 c 为准）。如以 a^1 与准，整个部分都比十二平均律偏高。

5）五度相生律大音阶的 e，a，b 各音比纯律都大一个普通音差（以 c 为准）。

4）总的说来，十二平均律与五度相生律较接近，而与纯律相差较大。

5.7.2 自然小音阶

三种律制的自然小音阶中各律的音分与的音程列出如下（以 c^1 为准，括弧内是以 a^1 为准）：

律名	c^1	d^1	$^\flat e^1$	f^1	g^1	$^\flat a^1$	$^\flat b^1$	c^2	b'
十二平均律	0	200	300	500	700	800	1000	1200	1110
五度相生律	0 (−6)	204 (198)	294 (288)	498 (492)	702 (696)	792 (786)	996 (990)	1200 (1194)	1110 (1104)
纯律	0 (16)	204 (220)	316 (332)	498 (514)	702 (718)	814 (830)	1018 (1034)	1200 (1216)	1088 (1104)

由上表可见：

1）五度相生律自然小音阶与十二平均律的自然小音阶相比，相差最大的音是^{b}a，偏低8音分（以c为准）。

2）纯律自然小音阶与十二平均律相比，相差最大的音是^{b}b，偏高18音分（以c为准）。

3）以c为准，五度相生律小音阶的^{b}e，^{b}a，^{b}b各音比纯律都小一个普通音差。

4）总的说来，十二平均律与五度相生律较为接近，而与纯律相差较大。

5.7.3 和声小音阶

与自然小音阶相比，和声小音阶是把^{b}b换成b音，只是^{b}a与b之间的增二度音程。与自然小音阶不同。把上表中不同的音列出如下：（以c为准）

律名	c^1………	$^{b}a^1$	b^1	^{b}a与b之间音分值
十二平均律	0………	800	1100	300
五度相生律	0………	792	1110	318
纯律	0………	814	1088	274

可见，五度相生律的增二度比平均律大，纯律的增二度比十二平均律小。纯律与五度相生律之间差两个普通音差（318－274＝44音分）。

5.7.4 音程、和弦

由于五度相生律存在大全音（204音分）、小半音（90音分）和大半音（114音分），纯律存在大全音（204音分）、小全音（182音分）和大半音（112音分），就造成了各种音程的不同以及和弦构成的不同。

例如：

由于导音与主音之间有大半音（纯律）和小半音（五度相生律）之分，于是，倾向于主音的程度有不同。五度相生律的导音更倾向于主音。

由于频率比的不同，音程和和弦的协和程度也有不同。显然，同样的音程及和弦，纯律是较为更加协和的。

不同律制的大、小三和弦的差别主要在于三音。十二平均律的五音（$\sqrt[12]{2}$）^{7}＝1.498；与五度律及纯律的3/2＝1.500相差很少）。

列出如下：

音程 / 律制	增二度(音分)	小三度(音分)	大三度(音分)	大三和弦三个音的频率比	小三和弦三个音的频率比
十二平均律	300	300	400	$1:(\sqrt[12]{2})^4:(\sqrt[12]{2})^7$	$1:(\sqrt[12]{2})^3:(\sqrt[12]{2})^7$
五度相生律	318	294	408	$1:\frac{81}{64}:\frac{3}{2}$	$1:\frac{32}{27}:\frac{3}{2}$
纯律	274	316	386	4:5:6	10:12:15

§5.8 有关音律问题的历史，现状和展望

5.8.1 我国历史上音律学的发展

我国古代从春秋战国时期（约公元前七世纪左右）就开始发明五度相生律，并由五声调式发展到七声调式，由五律到十二律。

秦、汉（约公元二世纪）以后一直到隋、唐（约公元二至九世纪），随着音乐的发展，要解决五度相生12次以后“旋相为宫”回不去的问题。一种办法是增加律数，于是就有京房（汉朝的一位郎中）提出出六十律，钱乐之（南北朝，公元五世纪）提出三百六十律等。

另一种解决“旋相为宫”回不去的办法是，在十二律内部调整音高；如何承天（南北朝）的新律，是按等差的办法解决，把生律12次以后的音管比出发的黄钟管短0.12寸均摊在十二律上。

晋朝的荀勖（公元三世纪）曾制作了一套不同长度的笛子，加上校正管口，得出过精确的笛律的数据。

在这段时期里，还发展了几种音阶和调式。如“雅乐音阶”（西周时始有的古音阶）是从某一音出发，向上五度连生六律而成（1.2.3.$^{\#}$4.5.6.7.$\dot{1}$）。即“七闰为角”。闰即变宫，以七音闰为角，即以五音为宫。“清乐音阶”（南北朝时汉族的民间音乐）是向上连生五律，向下生一律而成（1.2.3.4.5.6.7.$\dot{1}$）。“燕乐音阶”（隋唐时西北地区少数民族音乐与汉族民间音乐结合而成）是向上连生四律，向下连生两律而成；（1.2.3.4.5.6.$^{\flat}$7.$\dot{1}$），即“四变为宫”是以第四音“变音”作为宫音。

后来，到明朝朱载堉发明十二平均律，早于西方，对音律学的发展作出杰出的、划时代的贡献。

5.8.2 欧洲古代音律学发展简述

古代欧洲的音律学也是以五度相生开始发展的。从公元前六世纪古希腊的毕达哥拉斯就用数学方法和弦的实验研究过音律，用五度相生得到各种律，与我国古代如同一辙。

古希腊把五度上生5次加下生一次造成七律。如以第三音为主音即成多里亚调式，（3.4.5.6.7.$\dot{1}$、$\dot{2}$、$\dot{3}$），以第二音为主音即成弗里季亚调式（2.3.4.5.6.7.$\dot{1}$.$\dot{2}$），以第一音为主音即为里第亚调式（1.2.3.4.5.6.7.$\dot{1}$），这是古希腊的三种主要调式。这三种调式都有前后各半，四个音的排列结构是一样的，即正格调式（参看本书第四章）。把这三种四个音结构的序列相互搭配，就成为其它调式（副格调式）。

一直到中世纪，欧洲教会采用“欧洲教堂调式”，还是沿用古希腊调式的名称，但具有不同含义（参看第四章）。

从十五世纪文艺复兴以后，欧洲发展了复音体音乐。为求得协和的音程，于是发展了纯律。为在键盘乐器上使纯律不至于太复杂，曾使用了“中庸全音律”，音阶中只有一种全音即中庸全音（Mean Tone）为193音分，以及一种半音即中庸半音为117音分，可以产生纯律的效果，但它只能适应7个大调（C，G，D，A，E，$^{\flat}$B，$^{\flat}$E）和4个小调（a，d；g，c）。为了解

决这些问题，还作了许多尝试，如1590年奥地利的爱尔萨兹（Elsasy）提出过十九平均律，荷兰的惠更斯（Huygens，1629-1695）提出三十一平均律，比利时的麦卡托（Mercatos，1512-1594）提出五十三平均律等。

后来产生了十二平均律。对十二平均律，十六世纪开始就不断有人研究，如：西班牙的萨里那斯（Salinas，1513-1590）在1577年，意大利的查里诺（Zarlino，1517-1590）在1588年，荷兰的斯台文（Stevin，1548-1620）在1596年，法国的美孙（Mersenne，1649-1706）在1636年都发表过十二平均律，但没得到推广使用。一般认为德国的威克迈斯特（Werckmeister，1649-1706）于1691年首创十二平均律，并推广使用。

5.8.3　当前几种乐制在世界上的区域划分

乐制（Tone System）是指音阶体系，主要的有五声音阶体系、七声音阶体系和四分之三音体系。乐制与律制有关，如四分之三音体系是来用某种生律方法才产生的。不同的律制可以产生同一乐制。如七声音阶用五度相生律，纯律或十二平均律都可产生。

大体上讲，世界上大多数律制都起源于五度相生律，因为它最能与其客观的依存即弦和管的长度的简单而有规律的变化相符合。可以这样认为：用三分损益法五度相生5次得c、g、d、a、e、五个音（从c开始）于是得五声音阶（c^1、d^1、e^1、g^1、a^1、c^2. 或宫、商、角、徵、羽、半宫）。后来感到。e^1与g^1之间和a^1与高八度c^2之间的音高间隔太大，于是有的用五度相生再向上、向下各生一律，得b和f，于是成为七声音阶。有的把e^1与g^1和a^1与e^2之间等分一下，于是得四分之三音。

当前五声音阶体系分布很广，在亚洲有中国、朝鲜、越南、日本、蒙古、苏联的亚洲地区，还流行于非洲、美洲的黑人及印第安人地区。

七声音阶的大小调式体系则主要统治了欧洲并影响到全世界。上述五声音体系的地区以及四分之三音体系地区也无不渗入七声音阶体系。

四分之三音体系是阿拉伯民族音阶体系的主要特征，除西亚，南亚，北非和阿拉伯国家以外，还及于东南亚的一些国家，并对我国西北少数民族也有影响。古阿拉伯有c至d与f之间的中立三度（355音分）和c至g与^{b}b之间的中立六度（853音分），含有频率比为$\frac{12}{11}$的151音分和$\frac{352}{234}$的143音分的音程，约是四分之三个全音。十九世纪末，又提出过二十四律。在各种阿拉伯调式中还有四分音，四分之三音，四分之五音。古印度有二十二律，各律之间距离接近四分音。我国一些地方戏曲和民间音乐如秦腔哭音和山西中路梆子中，在五声音阶徵调式（$\underset{\cdot}{5}$、$\underset{\cdot}{6}$、1、2、3、5）两个小三度中间加入中立三度（约347音分）和中立七度（约1049音分）；中立“宫”调式中还有中立四度，与c的频律比是$\frac{11}{8}$（551音分）。德国民间音乐中也有11倍频的中立四度。土耳其的十三律制也属四分之三音体系等。

除以上律制的外，还有泰国，缅甸和我国潮洲音乐中的七平均律，印尼西爪哇等地的五平均律、十平均律以及七律制、九律制等。

5.8 4　音律学的应用和发展

音律学的问题不仅是一个历史问题或理论问题，也是一个很实际的问题。

1）首先，各种律制实际上还都在运用。虽然，十二平均律在当前的音乐中基本上占着统治地位，特别是在键盘乐器和有品位乐器参加的、要经常变调的独奏、独唱或合奏、合唱中，必须跟着这些不能或不易任意改变音高的乐器走的时候，更是这样。但是由于传统的影响，提琴等自由弦乐器还有五度相生律的倾向，特别在脱离乐队独奏时会显示出来。无伴奏合唱以及乐器强调和弦谐和的效果时，又倾向于纯律。实际上在乐器演奏时和歌唱时，并不老是一成不变的适应某种律制，而是常常会随机适时变化的。了解几种主要的律制，了解它们之间的差别程度，对于更好地了解音乐，恰如其分地掌握演奏的分寸是有好处的。

从古到今，一直有有关适应于非平均律的“律制琴”的研制。但是从前述的五度相生律特别是纯律的生律复杂关系，以及从实测的小提琴演奏家独奏时的音律，实际上也不是很准确的属于哪种律制类型的情况看来，律制琴的发展是否有必要，还是值得商榷的。即使有某些科研价值，也不如用计算机来完成更为简单而有实效。

曾经有人精密统计过二十位著名的歌唱家唱的颤音（Vribrato）的音高振动幅度约在62-96音分之间，这就很大程度上掩蔽了律制之间的差别。

2）测出人耳对不同频率、不同音色、不同强度、在不同环境条件下对音高差的最小分辨限，对于制定不同律制的容许的差别程度，对于音律学研究的细分限度，以及对于确定乐器标准等，都是有实际意义的。

3）了解不同律制下和弦的协和程度，对于理解和弦的进行、连接和解决，以及从物理上掌握和声规律等，都是有好处的。

思考题：（附参考答案）

1. 用十二平均律，由 a^1=440.00Hz

（a）算出 b 的频率。（246.941Hz）

（b）算出 $^be^2$ 频率。（622.025Hz）

2. 用十二平均律，由 c^1=261.6255Hz；

（a）算出 d^2 的频率。（587.33Hz）

（b）算出 ^ba 的频率。（207.65Hz）

3. 算出（a）比 a^2=880.00Hz 高2音分（881.02Hz）；（b）低6音分（876.96Hz）；（c）高24音分（892.28Hz）；（d）低50音分的音的频率（854.95Hz）。（可用两种方法：（1）利用（5.1）式，（2）利用（5.2）式）。

4. 与以下各音的频率相差1Hz，其音分差是多少？

(a)	c	(26 或 27)
(b)	a^1	(3.9)
(c)	e^3	(1.5)
(d)	c^5	(0.41)

5）用五度相生方法生律，从 c^1 开始，算出 $^\#f^1$, $^\#c^1$, $^\#g^1$, $^\#d^1$, $^\#a^1$, $^\#e^1$, $^\#b^1$ 各音与 c^1 的频率比和用音分表示的与 c^1 的音程。

律名	c^1	$^{\#}f^1$	$^{\#}c^1$	$^{\#}g^1$	$^{\#}d^1$	$^{\#}a^1$	$^{\#}e^1$	$^{\#}b^1$
与 c^1 的频率比	1	$\frac{(\frac{3}{2})^6}{2^3}=\frac{729}{512}$	$\frac{(\frac{3}{2})^7}{2^4}=\frac{2187}{2048}$	$\frac{(\frac{3}{2})^8}{2^4}=\frac{6561}{4096}$	$\frac{(\frac{3}{2})^9}{2^5}=\frac{19683}{16384}$	$\frac{(\frac{3}{2})^{10}}{2^5}=\frac{59049}{32768}$	$\frac{(\frac{3}{2})^{\prime}}{2^6}=\frac{177147}{131072}$	$\frac{(\frac{3}{2})^{12}}{2^7}=\frac{531441}{524268}$
与 c^1 的音分差	0	612 (611.73)	114 (113.69)	816 (815.64)	318 (317.60)	1020 (1019.56)	522 (521.51)	24* (23.46)

6）用五度相生方法生律，从 c^1 开始，算出 $^{b}d^1$，$^{b}g^1$，$^{b}c^1$，$^{b}f^1$，$^{bb}b^1$，$^{bb}e^1$，$^{bb}a^1$，$^{bb}d^1$ 各音与 c^1 的频率比和用音分表示的与 c^1 的音程。

律名	$^{b}d^1$	$^{b}g^1$	$^{b}c^1$	$^{b}f^1$	$^{bb}b^1$
与 c^1 的频率比	$(\frac{2}{3})^5\times 2^3=\frac{256}{243}$	$(\frac{2}{3})^6\times 2=\frac{1024}{729}$	$(\frac{2}{3})^7\times 2=\frac{4096}{6561}$	$(\frac{2}{3})^8\times 2=\frac{8192}{6561}$	$(\frac{2}{3})^9\times 2=\frac{32768}{19683}$
与 c^1 的音分差	90 (90.22)	588 (588.27)	1086 (1086.31)	384 (384.36)	882 (882.40)
	$^{bb}e^1$	$^{bb}a^1$	$^{bb}d^1$		
与 c^1 的频率比	$(\frac{2}{3})^{10}\times 2=\frac{65536}{59049}$ 180	$(\frac{2}{3})^{11}\times 2^7=\frac{262144}{177147}$ 618	$(\frac{2}{3})^{12}\times 2^8=\frac{1048576}{531441}$ -24*		
与 c^1 的音分差	(180.45)	(618.49)	(1176.54 -23.46)		

7）根据各音之间的频率关系，以 a^1=440.00Hz；计算出五度相生律自然大音阶各音的频率；与 十二平均律相比，各音相差多少音分？

频率为各音的频率乘 $\frac{440.00}{441.94}=0.995610$，求音分差为从 a^1 生律起算。

律名	c^1	d^1	e^1	f^1	g^1	a^1	b^1	c^2
生律次数	−3	−1	1	−4	−2	0	2	−3
与十二平均律音分差	−6	−2	+2	−8	−4	0	+4	−6

8）以 a^1=440.00Hz 计算五度相生律自然小音阶各音的频率；与十二平均律相比，各音相差多少？

求频率方法同上题。

---

* 简单起见，作 24 音分。

律名	c^1	d^1	$^\flat e^1$	f^1	g^1	$^\flat a^1$	$^\flat b^1$	c^2
生律次数	−3	−1	−6	−4	−2	−7	−5	−3
与十二平均律音分差	−6	−2	−12	−8	−4	−14	−10	−6

9）以 c^1=261.26Hz，计算出纯律自然大音阶，纯律自然小音阶各音的频率。

律名	c^1	d^1	e^1	f^1	g^1	a^1	b^1	c^2
频率（Hz）	261.62	294.33	327.03	348.83	392.44	436.04	490.55	523.25
律名			$^\flat e^1$			$^\flat a^1$	$^\flat b^1$	
频率（Hz）			313.95				418.60	470.93

10. 以 a^1=440.00Hz 计算出纯律自然大音阶，自然小音阶各音的频率及其与十二平均律的音分差。

律名	c^1	d^1	e^1	f^1	g^1	a^1	b^1	c^2
			$^\flat e^1$				$^\flat a^1$	$^\flat b^1$
频率	264.00	297.00	330.00	352.00	396.00	440.00	495.00	528.00
（Hz）			316.80				422.40	475.20

以 c^1 为准，a^1 比平均律低 16 音分，如果以 a^1 为准，则每个音都加 16 音分即可，即

律名	c^1	d^1	$^\flat e^1$	e^1	f^1	g^1	$^\flat a^1$	a^1	$^\flat b^1$	b^1	c^2
音分差	16	20	32	2	14	18	30	0	34	4	16

11. 比较十二平均律，五度相生律，纯律的大三和弦和小三和弦频率比之间的差别。

乐律	大三和弦	小三和弦
十二平均律	$1:(\sqrt[12]{2})^4:(\sqrt[12]{2})^7$（1：1.2599：1.4983）	$1:(\sqrt[12]{2})^3:(\sqrt[12]{2})^7$（1：1.1892：1.4983）
五度相生律	$1:\frac{81}{64}:\frac{3}{2}$（1：1.2656：1.5000）	$1:\frac{32}{27}:\frac{3}{2}$（1：1.1852：1.5000）
纯律	4：5：6（1：1.2500：1.5000）	10：12：15（1：1.2000：1.5000）

参考资料：

1. 缪天瑞：《律学》，人民音乐出版社，1983 年版。
2. 蔡宾牟、袁运开：《物理学史讲义—中国古代部分》，高等教育出版社，1985 年版。
3. 吴钊、刘东升：《中国音乐史略》，人民音乐出版社，1985 年版。
4. 中国艺术研究院音乐研究所：《中国音乐词典》，人民音乐出版社，1985 年版。
5. 王沛纶：《音乐辞典》，文艺书屋。
6. 龚镇雄：“律制的物理基础”。

第六章　声谱

§6.1　引言

6.1.1　谱（Spectrum）

谱者，"布也"，"列其事也"（《史记》）。谱是"按照事物的规则或系统编成的表册"（《辞海》）。用物理学或数学上的讲法，就是某个物理量（或函数）对于另一个物理量（自变量）的分布。

物理学上有光谱——光的能量按波长的分布，频谱——振动的能量按频率的分布。核物理中有粒子飞行时间谱——各种快、慢粒子飞行经过一定距离所需时间多少的排列。化学分析上用质谱——带正电的离子在磁场中偏转程度的排列。气象学上有"滴谱"——云中水滴多少按水滴直径大小的排列。印染工业上有色谱，物质结构的研究上有能谱，无线电电子学中有波谱等。

除了自然科学或技术科学上用到"谱"以外，社会、生活等各个方向也有各种"谱"。如年谱——按年份顺序排列的事件；棋谱——按下棋先后顺序列出的棋局；家谱——家族中按辈份和亲属关系列出的名字。另有药谱，乐谱，舞谱，脸谱，词谱，曲牌，诗韵等。

按各门学科在各个层次都由一些要素构成的观点，各要素之间的相互依存关系也就构成了各式各样的"谱"。

物理方法是迄今为止客观地研究音乐声的一种主要的手段。因此，我们就把构成音乐声的各个要素以及由它们之间的关系构成的各种声谱先来介绍一下。

6.1.2　描述声音的参量一声谱（Spectrum of Sound）

如前所述，音乐上描述声音的要素有：音长（时值）、音高（频率）、响度（音强）和音色。而实际上音色也是由前面三个要素构成的。

物理学上描述一个声音至少有时程，频率和声强三个要素，如某个声音持续 0.5ms，频率是 440.00Hz，声强级是 60dB。这是假定声音是持续的，强度是不变的。但实际上一首乐曲从来不是一个稳定的过程，频率、强度随时都在变化，因此，就有各种的谱。

于是，有声强随时间变化的描述一动态图，声强随频率变化的描述一频谱图，频率随时间变化的描述一旋律图等这些声谱，还有把这三项在一起表示的三维声谱。在音乐声的分析或表示中，我们常常用到频谱。频谱只是声谱中的一种，不要把频谱与声谱等同起来。

6.1.3　研究声谱的意义

声谱在音乐声研究中占有很重要的地位。

1）迄今为止，分析音质或音色的客观方法还主要靠频谱分析。例如，提琴的音色比二胡丰满，在频谱上可以表现出来有多得多的高次谐波。

2）用声谱可以鉴别乐器制造、演奏及歌唱的质量。例如歌唱演员比一般人讲话的频谱在

2kHz～3kHz 之间多一个共振峰，优质小提琴共振峰宽、谐波丰富。

3）．用频谱可以区分是何种乐器的演奏以及什么人在唱歌。

4）．用声级记录、波形记录等，可以对音乐进行的客观的动态分析，为是研究音乐的常用手段。

5）电子乐器是模拟各种乐器的频谱，然后再加以重现。合成器上可以用谐波合成的方法来产生各种音色。

6）为了用计算机采样或记谱，要提取音高信息，要分析频谱。

§6.2 时间谱——声音的时程特性

6.2.1 声强随时间的变化谱

1）声波的波形

波形图是波幅 A 随时间 t 变化的曲线。

纯音（Pure Tone）的波形是正弦曲线，如图 6-1。

实际的声波波形是很复杂的，如图 6-2。

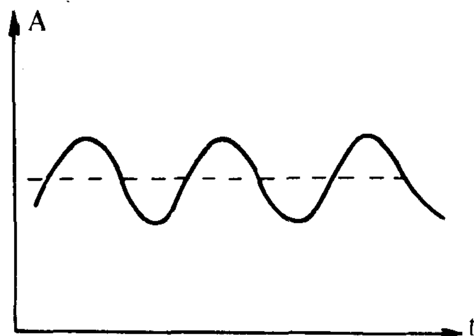


图 6-1 纯音的波形

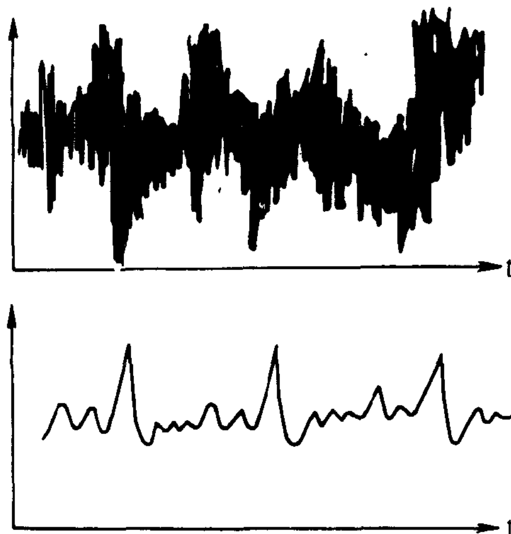


图 6-2 声音的波形

2）波形的合成和分解

纯音的大三和弦的波形如图 6-3（a）所示。钢琴的大三和弦的波形如图 6-3（b）所示，与纯音相差不多。

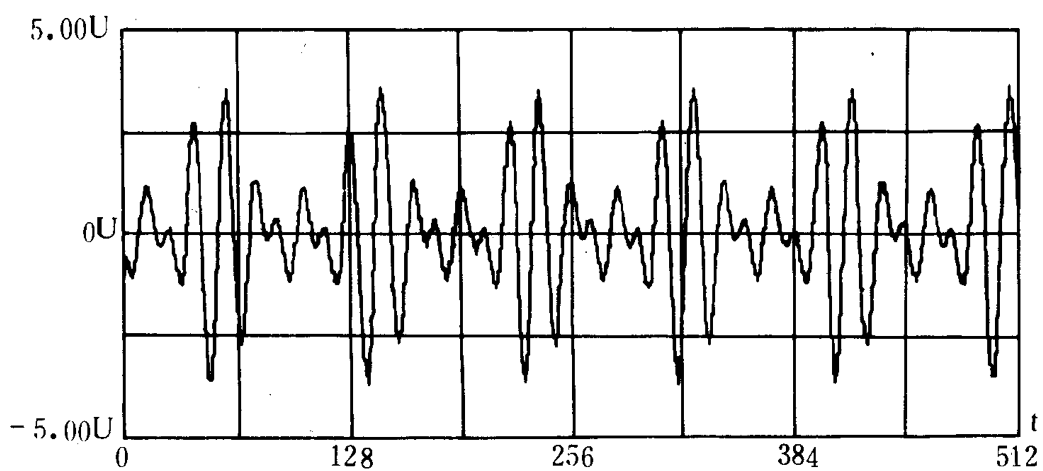
单簧管的频率成分是基频、三倍频、五倍频较强，如图 6-4（a），叠合起来接近方波，如图 6-4（b）。所以我们常用方波来代表管乐。

两个频率接近的波 f_1 和 f_2 叠合起来，其中包括以（f_1-f_2）的频音振动，如图 6-5。

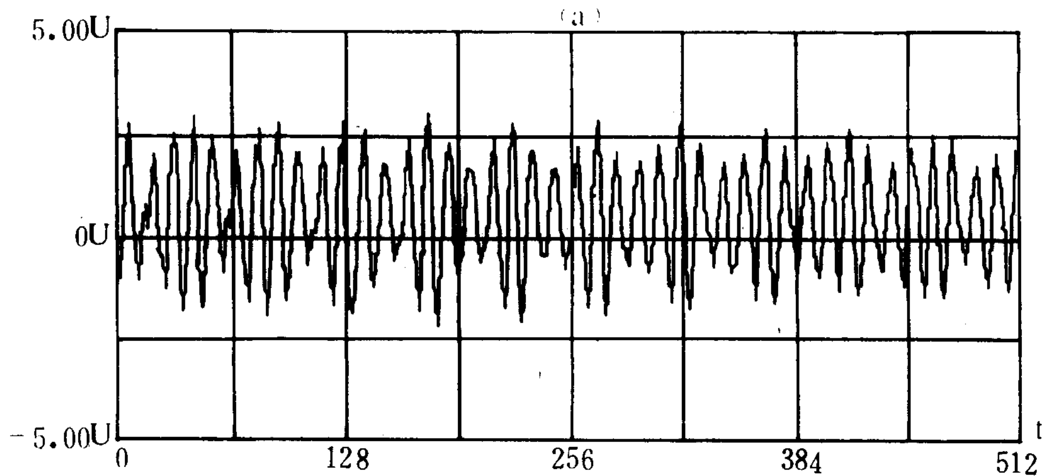
3）动态图、声级记录

动态图是声强随时间的变化，常用对数图谱。声强也常用声压级表示，即 SIL（声强级）—t 图或 SPL（声压级）—t 图。用声级记录仪可以得到声强级随时间的变化，图 6-6 是用声级记录仪记录的贝多芬《月光》钢琴奏鸣曲中的几个小节的动态图。

4）节奏谱实际上也是一种声强的时间谱。

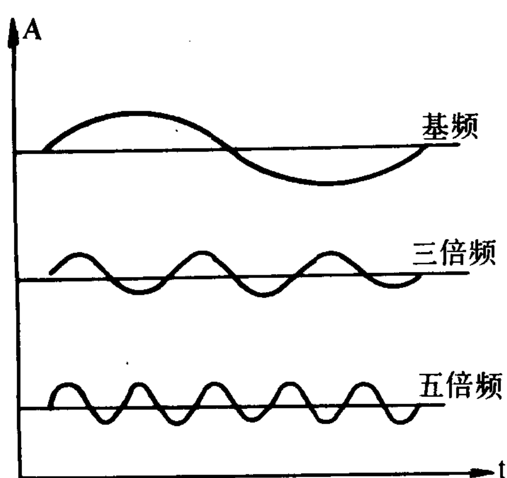


(a)

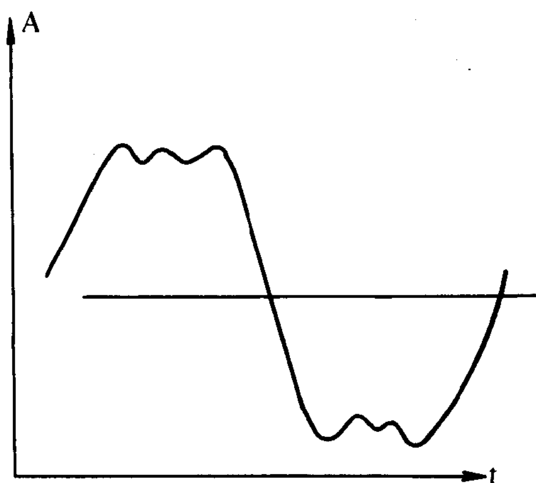


(b)

图 6-3　大三和弦的波形（a）纯音（b）钢琴



(a)



(b)

图 6-4　波形的叠合

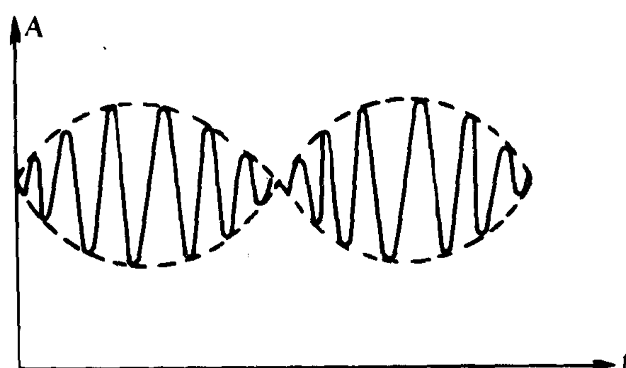


图 6-5 拍频



图 6-6 月光奏鸣曲的动态音

6.2.2 音高随时间的变化谱

1）频率——时间谱

声音的记录上常常以频率为纵轴，以时间为横轴，这就是频率——时间谱，即 f-t 图。为图 6-7 所示。这也常常是三维声图上的一个断面。

2）五线谱与旋律线

五线谱很像一个频率随时间的变化图，五线谱上的旋律线形象地表示声音的高低，但纵轴不是与音高成比例的，如图 6-8 所示。



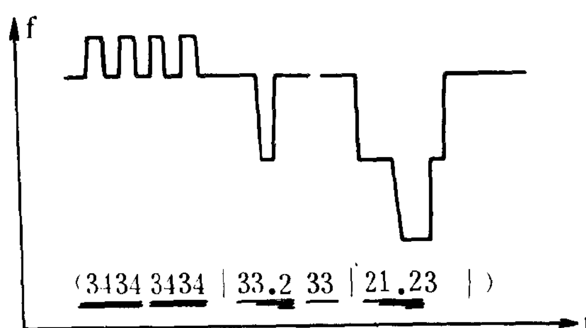


图 6-7 f-t 图
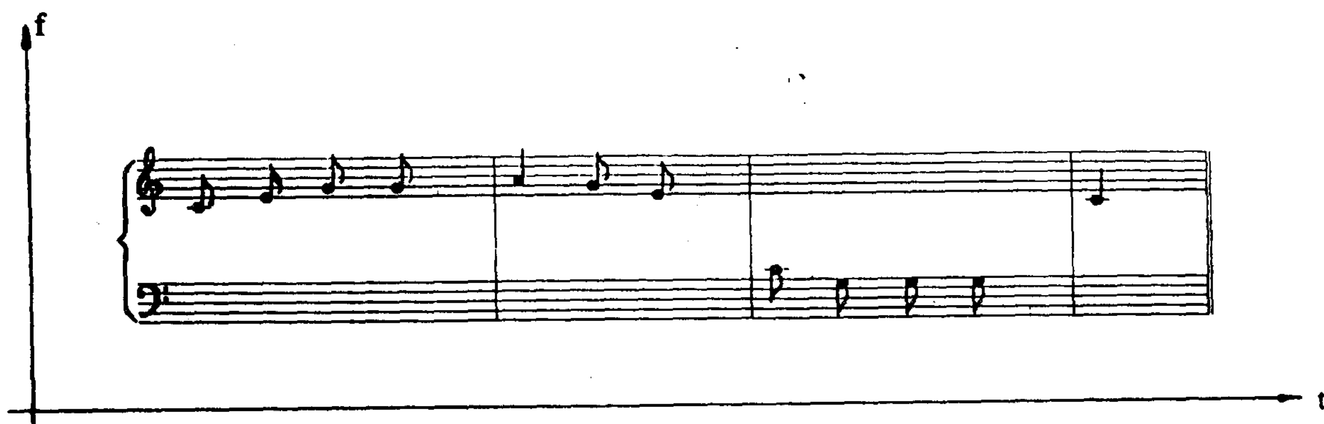


图 6-8 五线谱与 f-t 图

6.2.3 音色随时间的变化谱

音色随时间的变化可以体现在频谱的共振峰频率随时间的变化上，这是声强—频率—时间三维声图的一个剖面，如图 6-9 所示。F_1，F_2，F_3，F_4 是第一至第四共振峰。

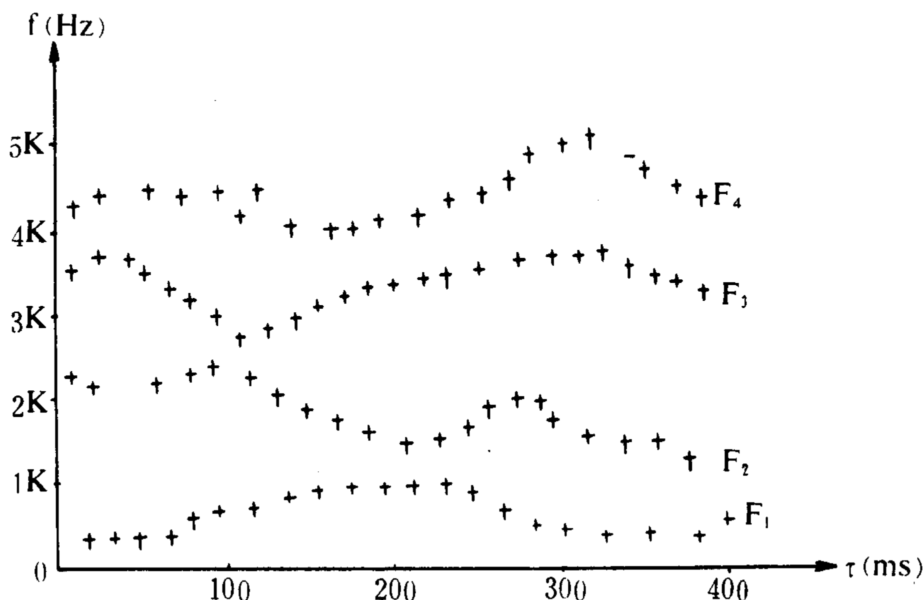


图 6-9 共振峰位置随时间的变化

6.2.4 声音的瞬态

声音的瞬态（Transient State）有两个含义：

1）各时刻声的特性

哪怕是在一个很短的时间里，几乎找不到某一个音乐声是完全保持稳定不变的。音乐本身就是在音高，音强和音色的运动和变化中实现的。因此，每一个瞬时，音乐声的各个要素都会不同。我们研究音乐，非但要研究其静态的特性，例如频谱，而且还更要考察其随时间的变化。实际上，所谓静态特性，也只不过是某一个时间区间内许多瞬态特性的平均值，或者是以某个瞬态特性作为代表而已。

2）音头和音尾

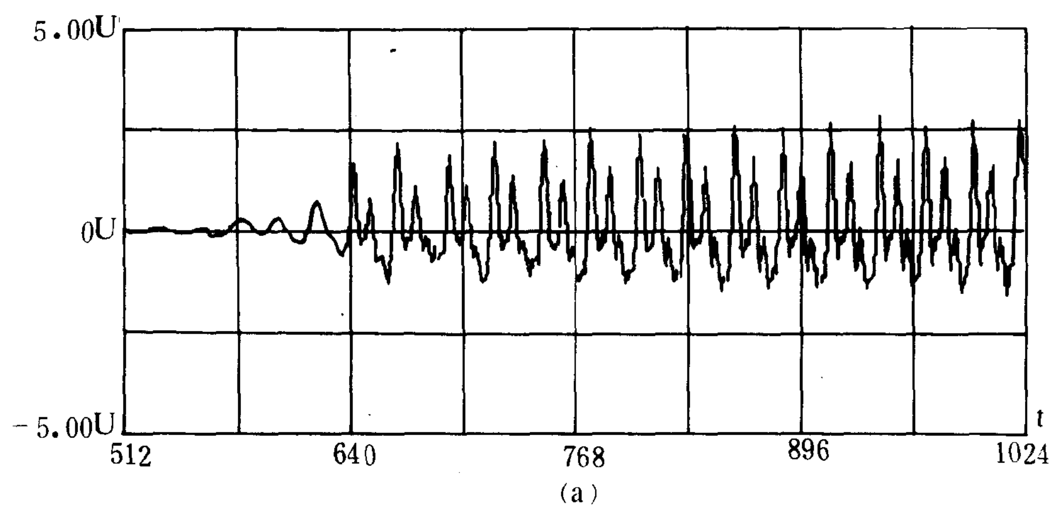
每一个声音在起始时和结束时有个建立和消失的过程。这就是"音头"和"音尾"，这是一个变化的过程，这也是一种瞬态。这种瞬态对听觉有很大的影响。图 6-10 (a)、(b)、(c) 分别给出人声、吉他等音头的波形，可以看出，它们都是在不断地变化着，之间的差别很大，而且波形又是不对称的。

对于管乐器来说，音头更为复杂，因为这与吹气方式又有很大关系。起始脉冲系列中任何相时于基频的偏离都令导致储存波形与输入波形之间的相互干涉，引起复杂的瞬态过程。

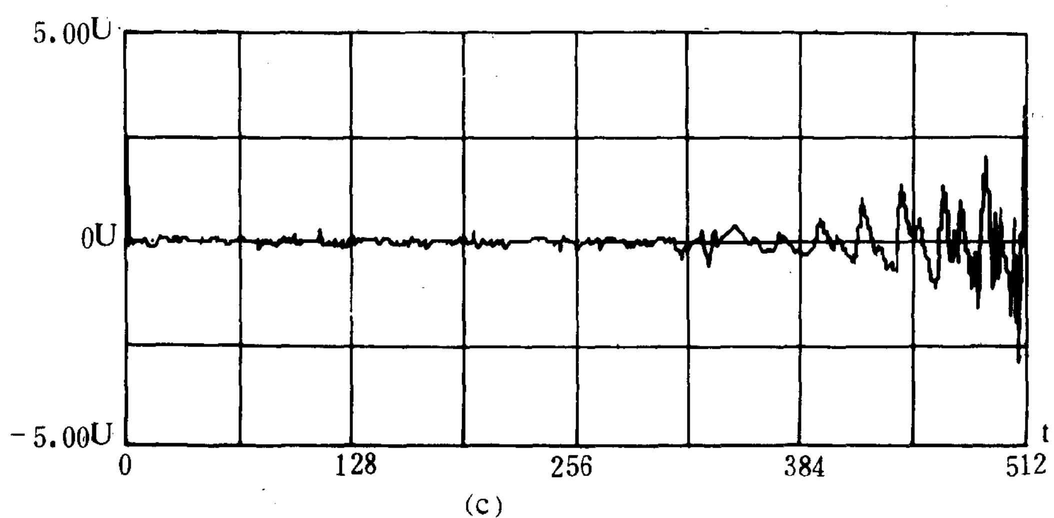
弦乐器的音头中还有擦弦声，管乐器的音头中还有吹气声，歌唱的音头中还有呼吸声等。

音尾的瞬态过程对于听觉也有很大影响。研究表明，一个声音在听觉上的中断和延时效

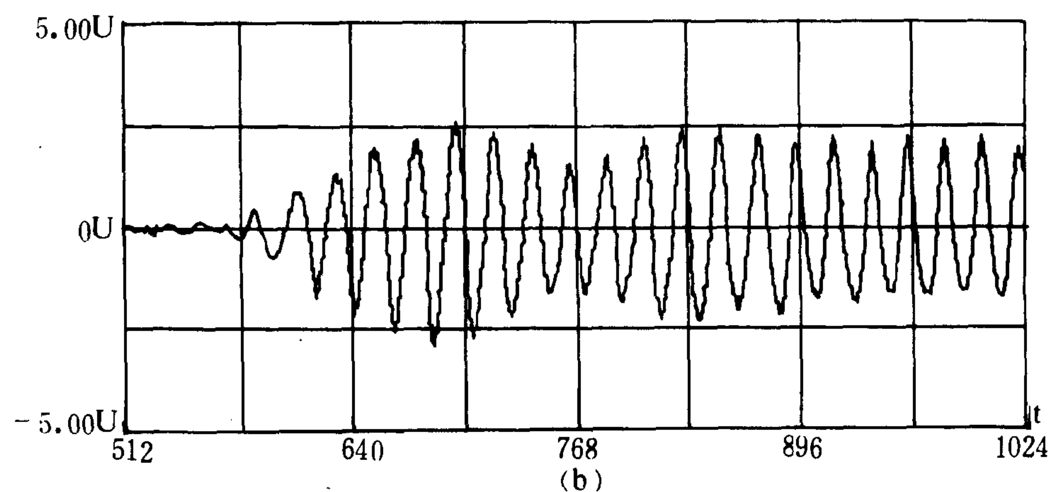
应，取决于音尾的波形状况。*



(a)



(c)



(b)

图 6-10　音头的波形 (a) 人声 (b) 吉他 (c) 手风琴

---

* 根据北京大学物理系音乐声学和计算机音乐研究室的实验工作.

§6.3 声音的频谱（Spectrum of Frequency）

6.3.1 基音（基频）、泛音（谐波）、分音

让我们再来复习一下有关频谱的基本概念。

一个音乐声不是一个简单的简谐波，而是由基频和谐波及分音组成的，有时，它既包括乐音也包括噪音和超声。

基音（Foudemental Tone）是一个音的成分中最低的频率。

泛音（Over Tone）频率等于基频的整数倍。

不是基频整数倍的频率叫分音（Partial）。许多乐器都有分音。

6.3.2 傅氏分析（Fourier Analysis）和音乐声的信号处理（Signal Processing）

在满足一定条件*下，以 T 为周期的周期函数 $f(t)=f(t+T)$ 可以用三角函数的级数表示，这种级数叫傅里叶级数，这种方法叫傅氏分析。实数形式的傅里叶级数

$$f(t)=a_0+\sum_{k=1}^{\infty}\left[a_k\cos(2\pi kt/T)+b_k\sin(2\pi kt/T)\right] \quad (6.1)$$

$$a_0=\frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t)\,dt,\quad \text{是直流分量},$$

$$a_k=\frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t)\cos(2\pi kt/T)\,dt$$

$$b_k=\frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t)\sin(2\pi kt/T)\,dt$$

或写成

$$f(t)=c_0+\sum_{k=1}^{\infty}C_k\cos(2\pi f_1 kt-\psi_k) \quad (6.2)$$

其中

$$|C_k|=\frac{1}{2}\sqrt{a_k^2+b_k^2},\quad \psi_k=tg^{-1}\frac{b_k}{a_k},\quad f_1=\frac{1}{T}\text{是基频。}$$

这样就把周期函数分解为频谱了。图 6-11 是其示意图。

如果是非周期函数，则在一定条件下可以用傅氏积分解决。**

音乐声可以用多种方法处理。为了把信号的时间函数加窗函数作傅氏变换，在一定时间内求平均功率谱；可以用快速傅氏变换；可以用固态滤波器作频谱分析；可以用线性预测方法等等。实际上处理的都是在一个时间区间内的平均谱。

---

* 这一定条件是狄利赫利条件，即①函数绝对可积；②有有限个极值；③在一个周期内有有限个第一类间断点。

** 非周期函数 $f(t)$ 满足狄利赫利条件，且在无限范围内无限可积时，则此函数可以用傅里叶积分表示，即

$$f(t)=\frac{1}{2\Pi}\int_{-\infty}^{\infty} s(\omega)\, e^{j\omega t}\,d\omega \quad (6.3)$$

$$s(\omega)=\frac{1}{2\Pi}\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\, e^{-j\omega t}\,dt \quad (6.4)$$

傅氏分析有实部和虚部。

6.3.3 线状谱（Line Spectrum）与连续谱（Continuous Spectrum）、乐音（Musical Tone）与噪音（Noise）

在物理上乐音是指有一定音高的、波形是有周期性的声音，反之则是噪音。

乐音是周期函数，可以用线状谱表示，如图 6-12。噪音则是连续谱，如图 6-13。也有混合谱，即既有连续的，又有线状的，如图 6-14。线状谱有一个谱线宽度问题。即使是分列的谱，声能也是分布在基频或谐波附近的一定的频率的范围内，即谱线有一定宽度。

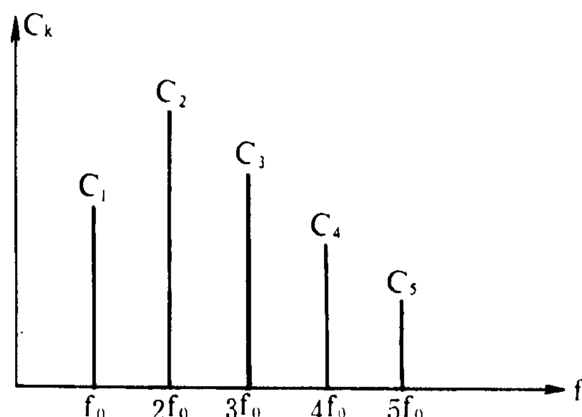


图 6-11 周期函数的谱分析

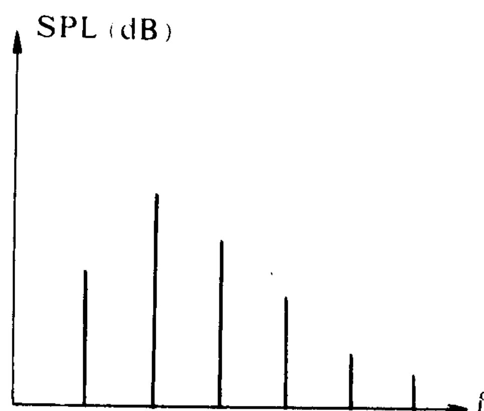


图 6-12 线状谱

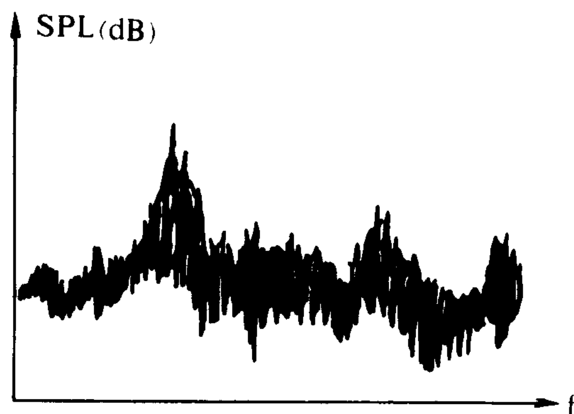


图 6-13 连续谱

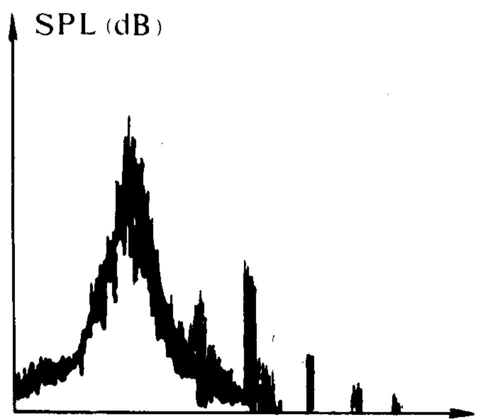


图 6-14 混合谱

6.3.4 线性（Linear）谱和对数（Logarithm）谱

由于基频和谐波的能量差别很大，所以频谱有时以线性关系表示能量，有时则以对数关系表示。对数关系容易显示出不同量级的谱线。图 6-15 是手风琴三排簧发声的 a^1，即基频为 220、440、880Hz 的频谱，纵轴是声功率。(a) 为线性谱，有许多谐波的波峰显示不出来，(b) 为对数谱，许多细微之处就显示出来了。图中纵座标 SPL 为声压级。

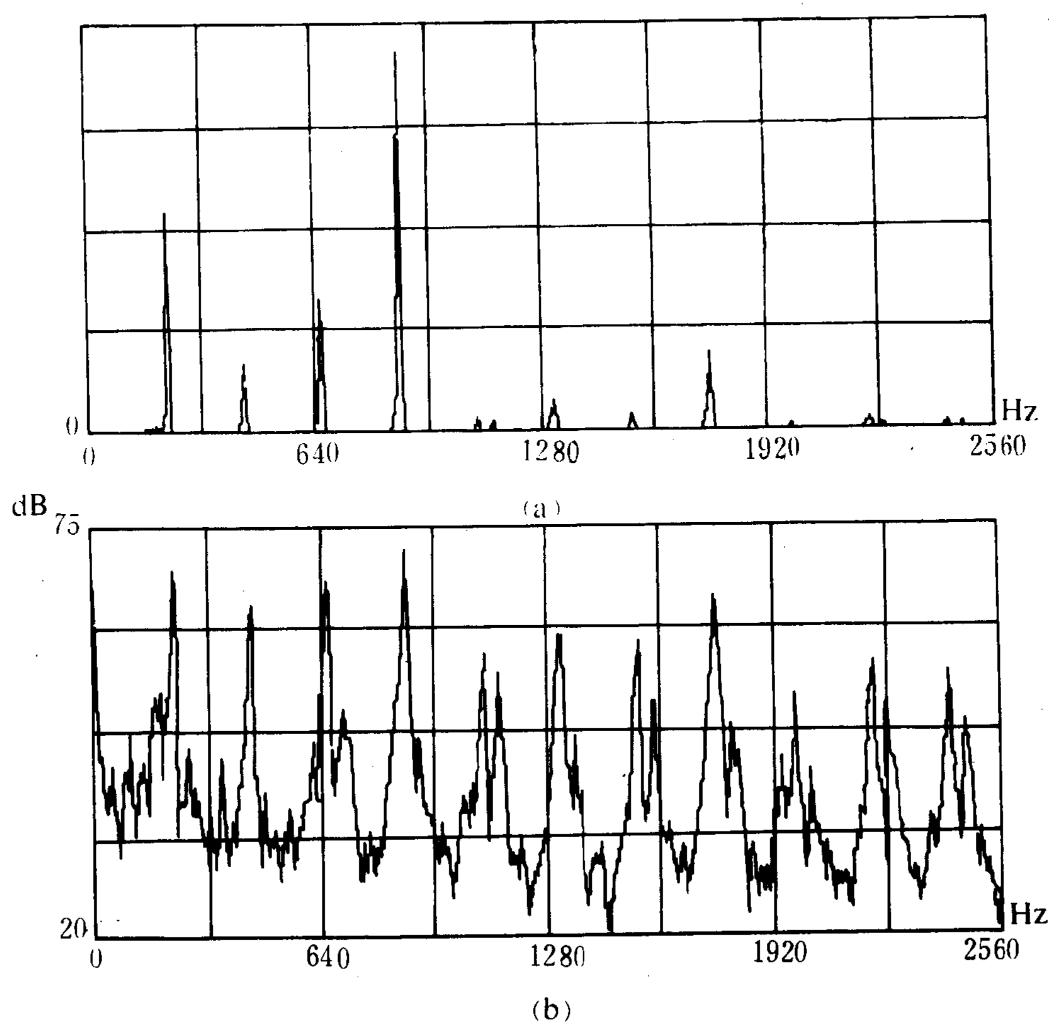


图 6-15 (a) 线性谱 (b) 对数谱

图 6-16 是一个男声的频谱，也是一个对数谱。实际上，普通的实际音乐声，包括乐器声和人声都是连续的，只不过当连续部分的能量相对来说较小时，看起来就成为分列的了。

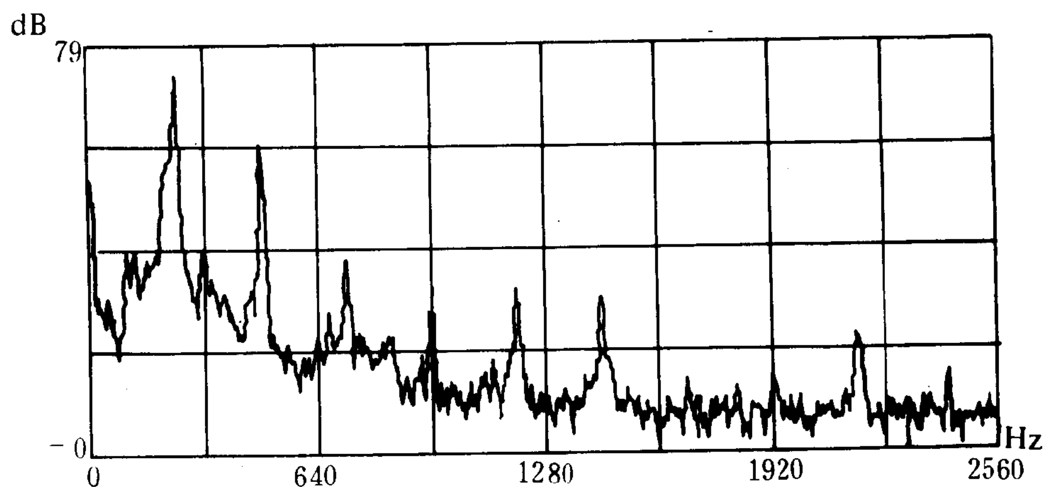


图 6-16 对数谱

频谱的纵轴可以是功率级，也可以是声压级。

图 6-15 和图 6-16 的横轴是线性的。在表示频率的很大跨度时，也有用对数坐标或不均匀坐标。

6.3.5 频带宽度（Band Width）、中心频率（Centre Frequency）

把声音作频谱分析要通过滤波器，若以一定的中心频率表示，这些中心频率称为规范频率。国际电声委员会（IEC）规定，全通频带上下限频率为下降 3dB 的上下频率限 f_L 和 f_H。对于倍频程滤波器，

$$\frac{f_H}{f_L}=2^1=2 \tag{6.5}$$

对于 1/3 倍频程滤波器，

$$\frac{f_H}{f_L}=2^{1/3}\approx 1.2599 \tag{6.6}$$

中心频率

$$f_0=\sqrt{f_L\cdot f_H} \tag{6.7}$$

带宽为

$$f_H-f_L=2\Delta f \tag{6.8}$$

以上表述如图 6-17 所示。

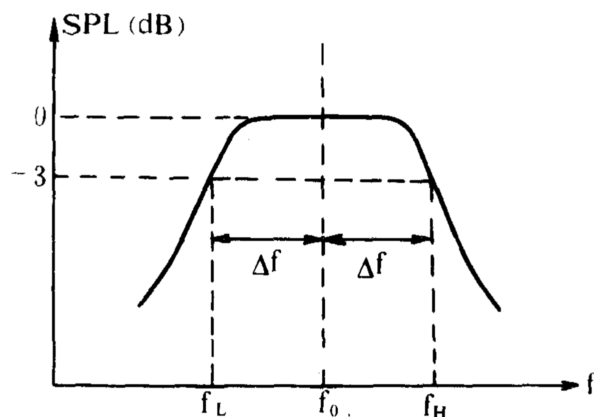


图 6-17 频带宽度

由式（6.5）、（6.7）、（6.8），对于倍频程滤波器，

$$\Delta f=\frac{0.7071}{2}f_0=0.3536f_0$$

由式（6.6）、（6.7）、（6.8），对于 1/3 倍频程滤波器，

$$\Delta f=\left(\frac{1}{2}\left(2^{1/3}-1\right)/2^{\frac{1}{6}}\right)f_0=0.1158f_0$$

约为倍频程带宽的 1/3。

常取的倍频程滤波的标称中心频率为 31.5、63、125、250、500、1000、2000、4000、8000、16000Hz。常取的 1/3 倍频程滤波的标称中心频率为 25、31.5、40、50、63、80、100、125、166、200、250、315、400、500、630、800、1000、1250、1660、2000、2500、3150……Hz。

在对音乐声进行频谱分析时，还常常是任其自然的频带显示基频与谐波或自行规定带宽。

6.3.6 一些波形的频谱

下面给出几种波形的频谱，如图 6-18 所示。

6.3.7 频谱的叠加定理

如有 $f_1(t)$ 的频谱是 $s_1(\omega)$，$f_2(t)$ 的频谱是 $s_2(\omega)$，则 $f_1(t)+f_2(t)$ 的频谱是 $s_1(\omega)+s_2(\omega)$。

任何波（音）看作是分量之和，则频谱也是分频谱之和。按理说，能叠加，也能分解，但实际是，各种波（音）的频谱可以叠加在一起，但是迄今为止还分不开。应该是，利用对标准频谱的分析，定有可能把各部分音对总频谱的贡献分析出来。

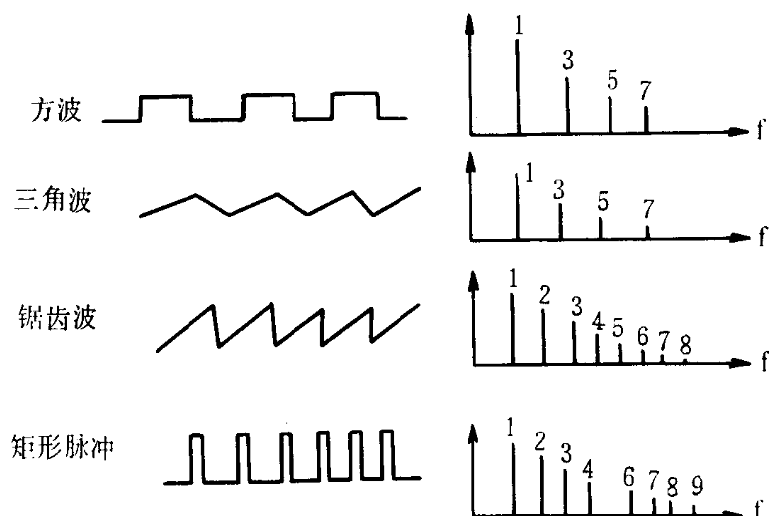


图 6-18 几种波形的频谱

6.3.8 共振峰（Formant）

共振峰是频谱图上包络线（Envelope）的极大值，如图 6-19 所示。频谱上的共振峰表示在这个频率上有强的声音或可以引起强的共鸣。一个乐器或人歌唱的共振峰多、宽而强，一般显示其声音的质量好。

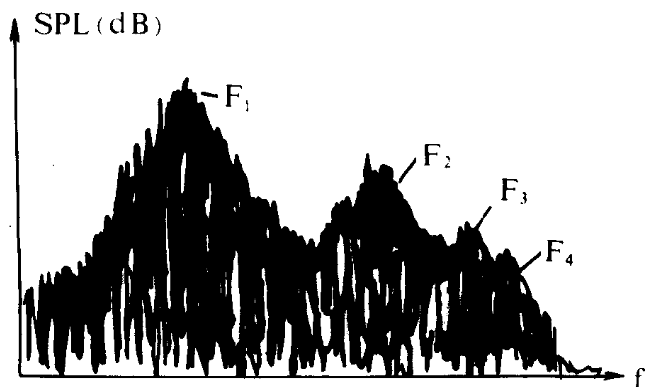


图 6-19 共振峰 F_1，F_2，F_3，F_4

不同的演奏或演唱方法也会引起共振峰的变化，如强奏可能使共振峰产生正位移，即向音高偏 高方向移动。假声唱法在高频段会出现共振峰等。

图 6-20 是一些乐器的包络形状：(a) 是吉他，(b) 是马林巴琴，(c) 是双簧管，(d) 是小提琴。

现在，已经有专门对共振峰的研究和应用，这对改善音质有很实际的意义。电子琴和合成器也可直接合成和控制共振峰。

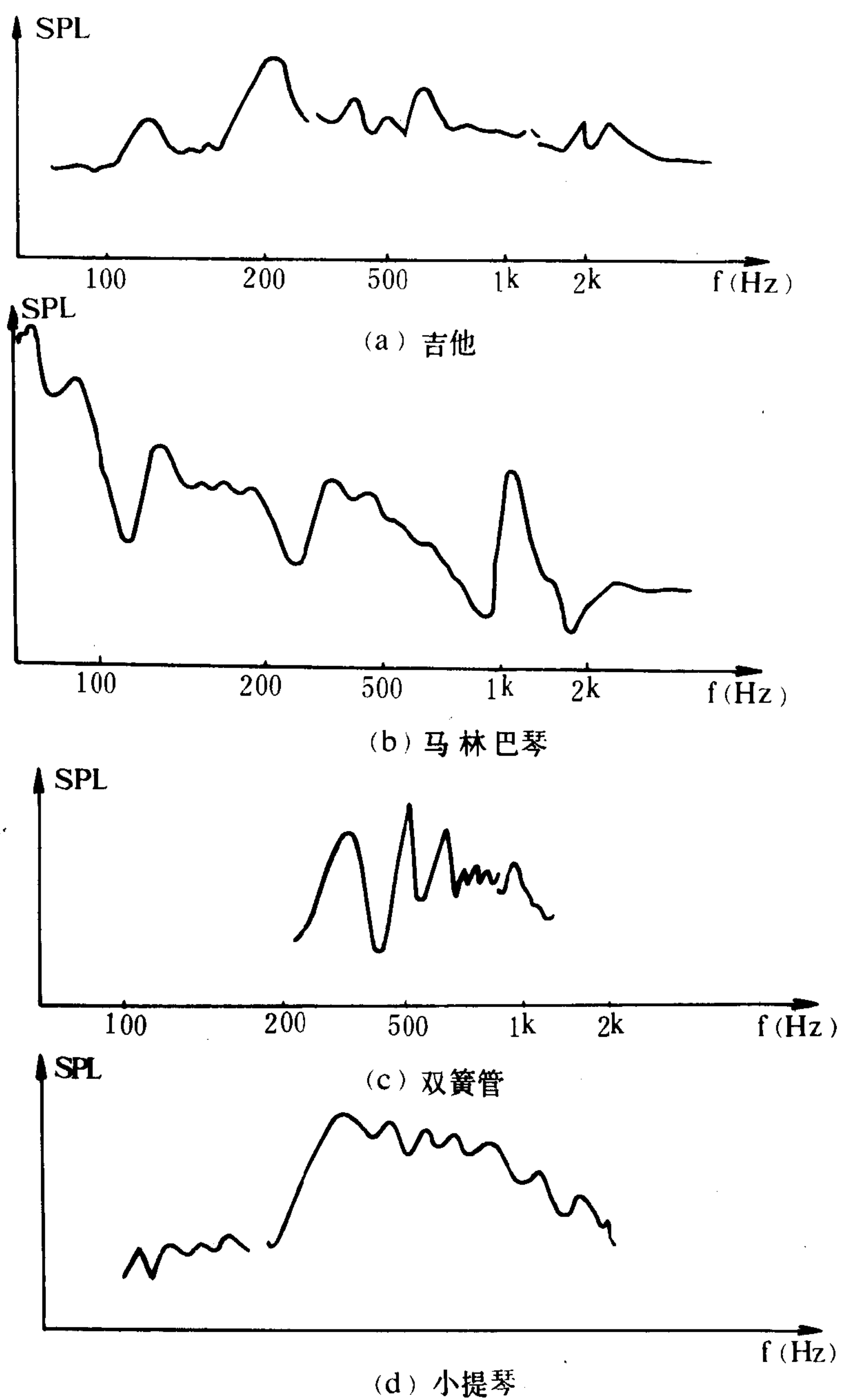


图 6-20 一些乐器的包络：(a) 吉他 (b) 马林巴琴 (c) 双簧管 (d) 小提琴

§ 6.4 三维声图（Three-dimensional Sound Pattern）
语图（Sonogram，Sound Spectrogram）

6.4.1 声波的立体描述

图 6-21 这样一个像山包的图是计算机上画出来的声的三维立体描述，即三维声图。x、y、z 轴分别是声的强度（I)、时间（t）和频率（f)。每个与 xy、yz 或 xz 面平行的“切片”就是动态曲线 I-t、频率变化曲线 f-t 和频谱 I-f。

6.4.2 语图

语图也是一种强度（I)、频率（f）和时间（t）的三维声图。因为一开始用于语言声学研究，就叫语图，用“语图仪”画出。语图是一个平面图，画在 f-t 面上，以线的粗细，颜色的深浅代表强度的大小。

图 6-22 是简单的语图，从左至右其中①是 800Hz 的纯音，时值是 0.5s，这是一种不强的哨笛声。②是 800Hz 的纯音，较强，时值 0.5s，也是哨笛声，③是 800-2kHz 的渐强又渐弱的音，持续 2s。④是 800-900Hz 之间起伏的颤音持续 1s，⑤是上面（或下面）的乐谱的声图。

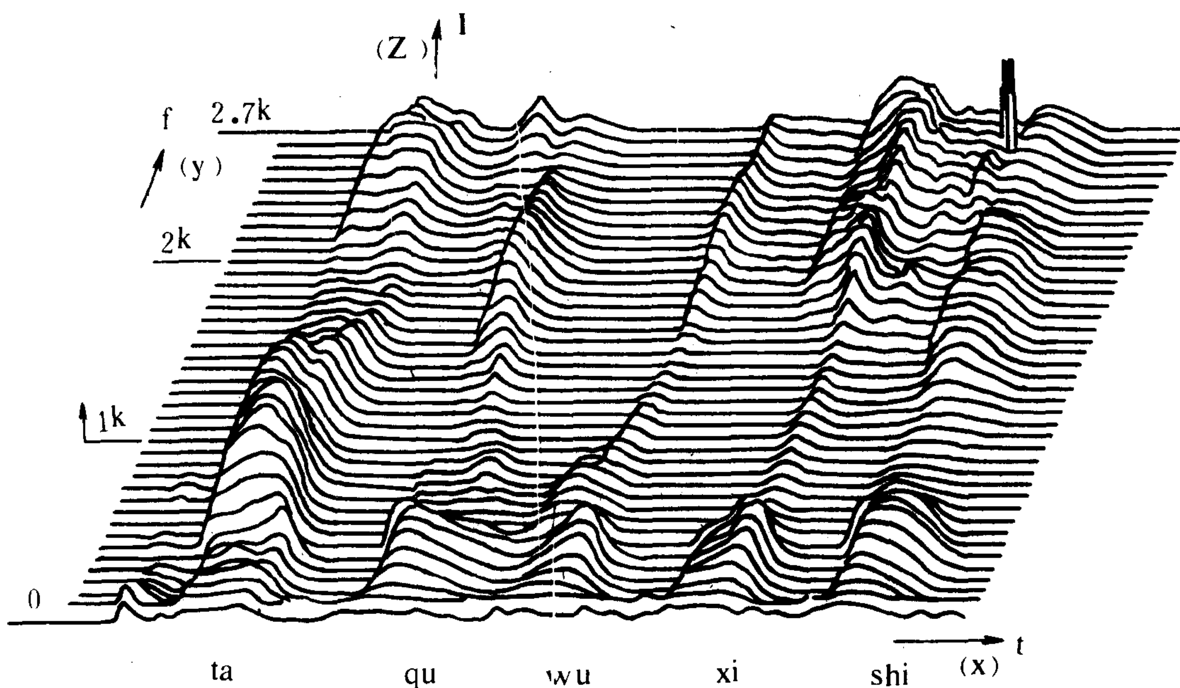


图 6-21 三维声图

图 6-23 是一张与图 6-21 对应的男声说话：“他（tā）去（qù）无（wú）锡（xī）市（shì）”的语图。频率范围是 0-2.5kHz。带宽 300Hz。

图 6-24（a)、(b）是不同带宽的语图。频率范围是 0-5kHz，每条横线间为 1kHz，线性图线，采用频率标度扩展方式（即放大照片）显示，(a）是宽带图，带宽 300Hz，可以看出共

振峰位置，辅音成分，(b) 是窄带图，带宽 45Hz，可以看出基频及谐波，由图上可见基频在 100-200Hz 之间，是男声：他（tā）去（qù）无（wú）锡（xī）市（shì）我（wǒ）到（dà）黑（hēi）龙（lóng）江（jiāng）。

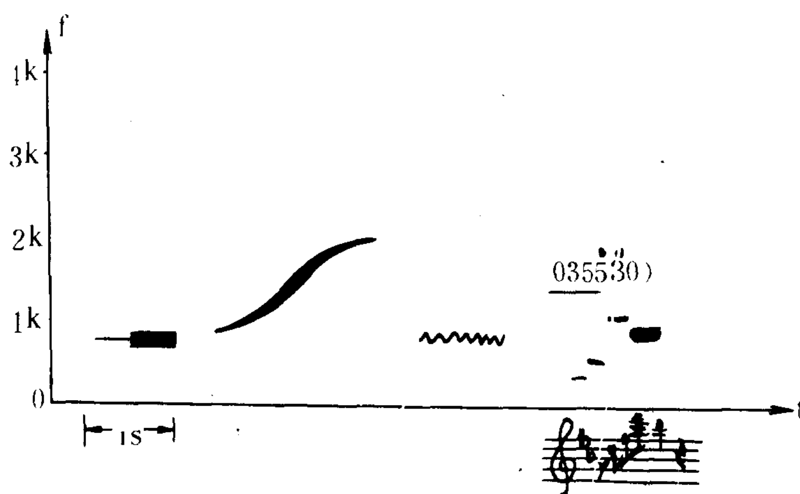


图 6-22　语图模式

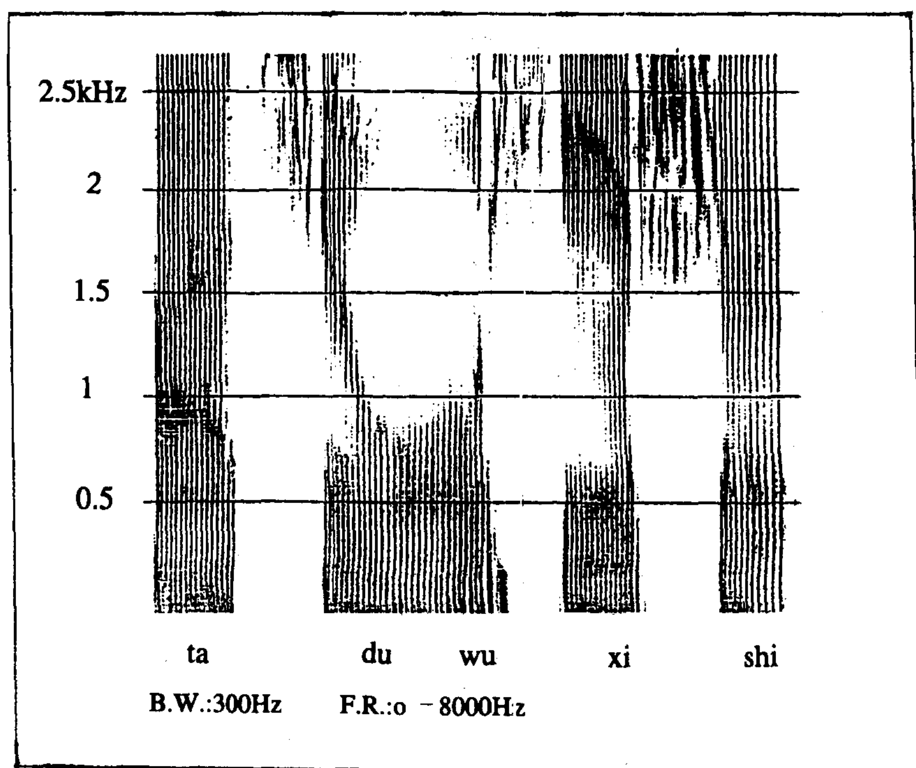


图 6-23　语图

图 6-25 是与图 6-21、6-23、6-24 对应的波形图。

6.4.3 模式化声图（Mode of Sound Pattern）

图6-26是几种典型的模式化声图，1是笛子型，谐波少，基音强；2是提琴型，二、五次谐波强，谐波完整；3是单簧管型，有一系列奇次谐波；4是钢琴型，谐波多，有差拍；5是铃型，特点是分音不稳定，也不同时开始和结束。

6.4.4 噪声的声图

噪声也有各式各样的，下图6-27中1是枯噪的鼓击，时值短，频率宽；2是在有回声的大厅里击鼓，频率广，混响长；3是木鱼的一连串的轻击，有些音高感；4是拉弦尔器的擦弓噪声；5、6是一定频段上较强的机器噪声；7是钗、钹等打击乐发出的噪声。

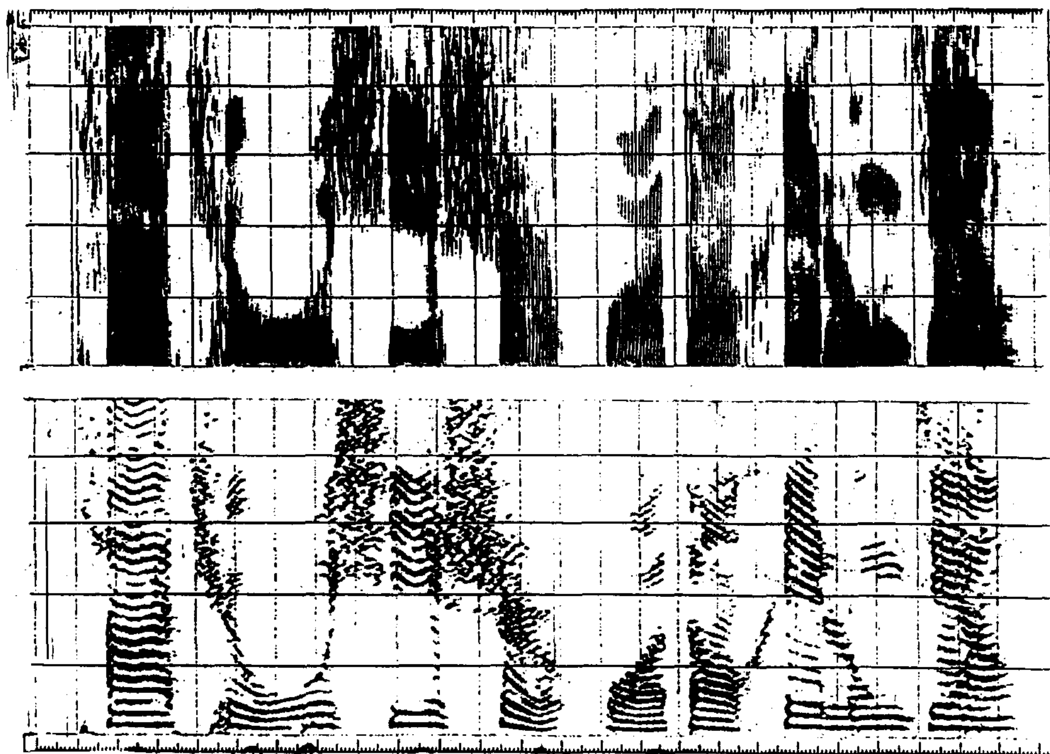


图6-24 语图

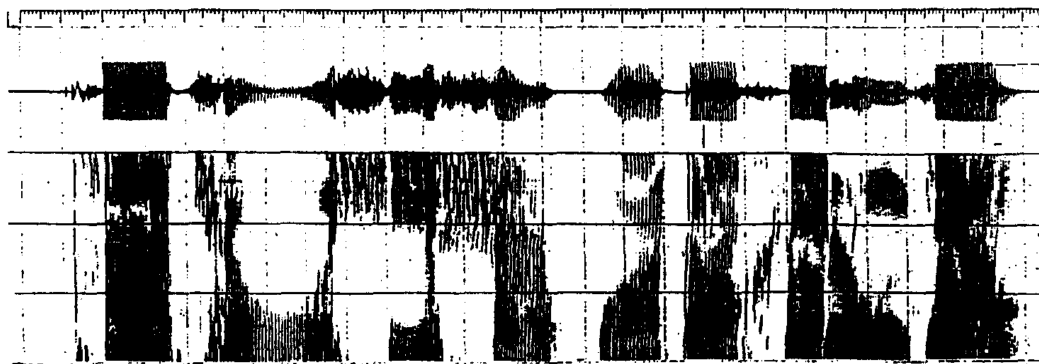


图6-25 波形图

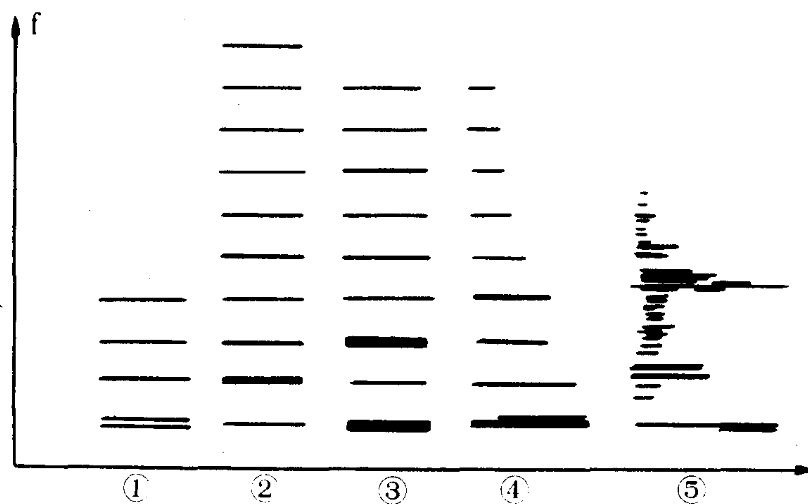


图 6-26 模式化声图

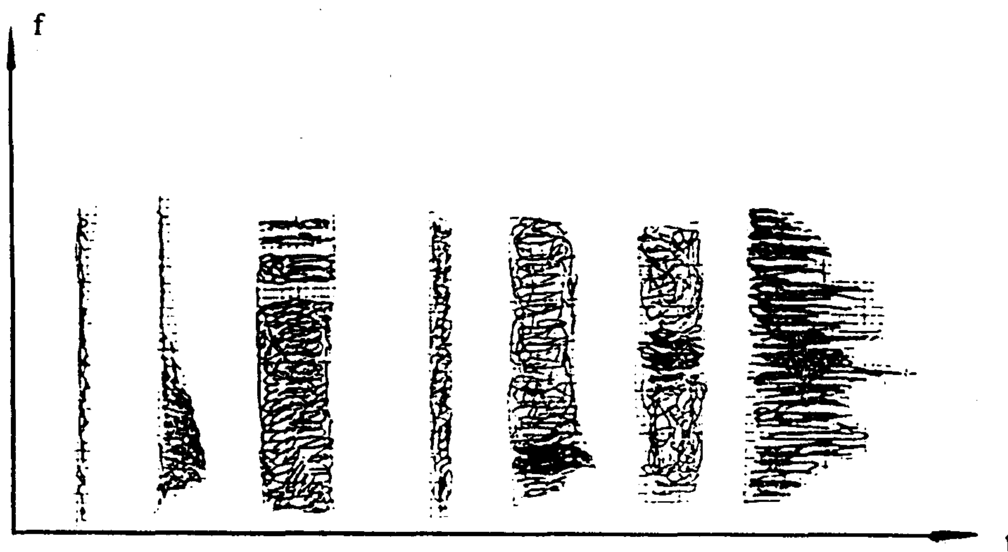


图 6-27 噪声的模式化声图

§6.5 声音的协和性与声谱

6.5.1 谐波的频率和音分

下面把各次谐波与基频的音程（音分值）算出，整理在 1200 音分之内。大体说来，如果是接近 100 的整倍数的音分数（100 音分除外），是比较谐和的。

谐波次数（倍频数）	1	2	3	4	5	6	7	8	
与基频的音程（音分）	0	1200	702	1200	386	702	969	1200	
谐波次数（倍频数）	9	10	11	12	13	14	15	16	
与基频的音程（音分）	204	386	551	702	840	969	1088	1200	
谐波次数（倍频数）	17	18	19	20	21	22	23	24	25
与基频的音程（音分）	105	204	298	386	471	551	628	702	773

可以看出，第 7（969’）、11（551’）、13（840’）、14（969’）、17（105’）、21（471’）、22（551’）、23（628’）等次谐波的音分数距 100 的整倍数较远，是较不谐和的。

6.5.2 音程的协和性及不协和性

同度的频率比 1：1，八度是 1：2。下面都以纯律来说明，纯五度是 2：3，纯四度是 3：4，是简单的整数比。听起来稳定、单纯，叫做完全协和音程。

大三度的频率比是 4：5，小三度是 5：6，大六度是 3：5，小六度是 5：8，是较简单的整数比。听起来较稳定，叫做不完全协和音程。

小二度的频率比是 15：16 或 24：25，大二度是 8：9，是不协和音程。

大三和弦的频率比是 4：5：6，它们在一些不太高次谐波上有相互叠合，所以比较协和。如图 6-28 所示。

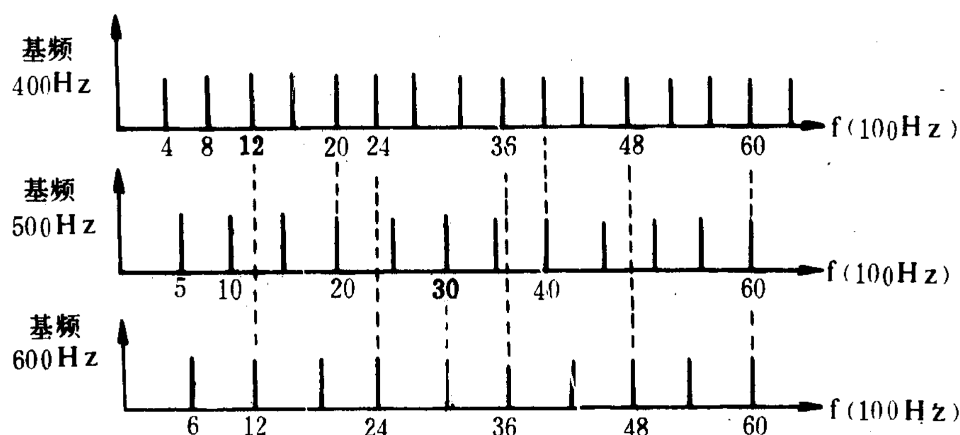


图 6-28 纯律大三和弦谐波的频谱

由图 6-28 可见，纯律大三和弦之所以协和，是因为组成纯律大三和弦的三个音（400. 500. 600Hz）的谐波有多次叠合。以 6000Hz 内为例，在 1200、2400、3600、4800Hz 处，根音（400Hz）与五音（600Hz）的谐波叠合；在 2000. 4000Hz 处，三音（500Hz）与根音（400Hz）的谐波叠合；在 3000Hz 处，三音与五音的谐波叠合；而在 6000Hz 处三个音的谐波都叠合。

这也说明纯律小三和弦频率比为（10：12：15）也是协和的，但其协和性比大三和弦较差。

从谐波的叠合程度也可以说明，为什么由五度相生律和平均律所生的同样的和弦，其协

和性较纯律为差。

§6.6 音色与频谱

6.6.1 决定音色的因素

音色是音乐声的一个主观量，但有其客观依据，过去有许多说法，认为音色只决定于频谱，这种说法不一定全面，但音色与频谱的关系是很密切的，这些是：

1）谐波和分音的数目；

2）谐波和分音的绝对强度和相对强度；

3）谐波和分音的长短；

4）分音的不协和程度；

5）声音的基频、谐波和分音在听音区里的位置。因为人耳的听觉灵敏度对不同频率的声音是不同的。因此，同样形状和频谱在不同听音区内会有不同的音色。这也说明，用某一音域里的频谱去扩展模拟整个乐器音域里的音色总是失败的。

以上是频谱问题。除此之外，决定或影响音色的还有：

6）瞬态状况；

7）听音条件的不同也影响音色。因为音色是一种主观感觉，它决定于实际听到的声音，在广场，在厅室，用耳机听，通过扩音系统听等，听到的声音已经经过环境条件的加工，是一个综合的效果，因此音色是不同的。

8）距声源的距离不同，声音中各个分量衰减状况不同，自然会有不同音色。

9）因人而异，每个人的听觉灵敏区不同，截止频率不同，与年龄、职业以及听音前的“历史”状况等都有关。

由上可见，音色是一个受诸多因素影响的量，所谓某某乐器、某某人的频谱，只是在特定条件下的产物，与采样条件也有很大关系。

6.6.2 一些谐和谱的音色

下面我们列出一些模式化声谱的音色，如图6-29所示：

①基频强，谐波不多，只有中频区—是一种复音，柔和，有天鹅绒的感觉。

②高次谐波突出——如军号，刺耳、尖锐。

③谐波多，低、中频强——如大提琴，丰满、有弹性。

④谐波不多且弱——如风琴，口琴。

⑤谐波多且弱——如二胡，力度不足，音“出不来”。

⑥不重要的谐波减弱，中、低频强——如长笛，圆润、温暖。

⑦中频弱，高、低频强——如罐头皮二胡，声音发“空”。

⑧无基频——如低音黑管，呈鼻音，不清晰。

⑨奇次谐波突出——这是单簧管音色。

⑩偶次谐波突出——如高音双簧管，音色透明。

⑪谱线不断拉开——如钢琴。

⑫无规则的分音——如敲铁。

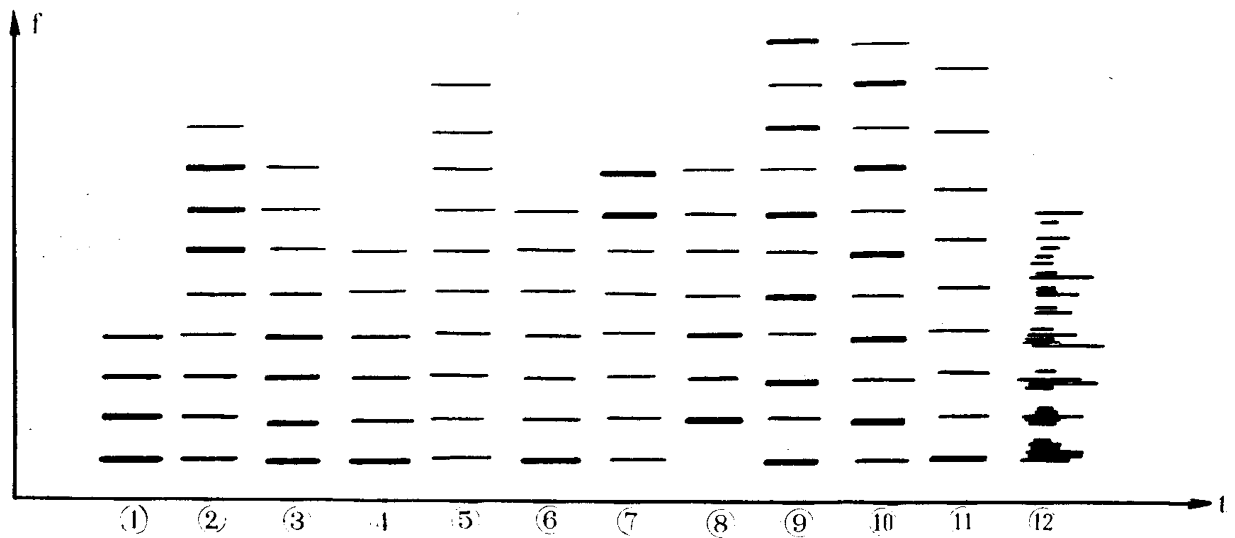


图 6-29　一些音色的谱

思考题：

1. 截取三维立体声图的一些与 xy、xz、yz 面平行的面，对图上的变化作出解释。

2. 比较各种乐器的声图，探讨声图与音色的大体关系。

3. 从各音之间谐波的频率关系，说明小三和弦比大三和弦的协和性差些，以基频为 400. 480. 600Hz 的小三和弦为例。

4. 说明下述各对名词的差别和关系：

(a) 谐波、分音；　(b) 乐音、噪声；

(c) 音高、频率；　(d) 波形、频谱；

(e) 声的波形、声的时程特性。

5、决定音色的因素有哪些，举例说明之。

参考书：

1. 刘永健：《信号与线性系统》，人民邮电出版社，1985 年版。

2. 包紫薇编译：《声学和音乐》，《乐器》，（1983，1984）

3. 管善群：《电声技术基础》。

第七章　乐器声学

§7.1　引言

7.1.1　乐器与音乐

乐器(Musical Instrument)是人们制造的或为人所利用的可以发出音乐声的物件或器具。

有人认为,人类在还没有产生语言之前,已经先有音乐了。据报导,日本学者黑泽曾发现有一个原始部族,没有语言,但会在一起贼唱,产生合唱的效果,发出和音。而音乐与乐器哪一个先有呢?应该说是先有乐器,才由乐器发出音乐声。当然,开始时,音乐也许只是一些节奏,或简单的音响。我国古代早有"击石拊石,百兽率舞"的记载,即是说敲击和拍打石块,就可以令百兽起舞。当然,这种音乐只能是简单的节奏和拍子了。

自古以来,音乐主要可以分为两大类,即人的歌唱声和乐器的演奏声。当然,现代音乐中还有时用一些自然声,如潺潺的流水声,海浪的拍岸声,虫鸟的鸣叫声等,可以称之为自然声,但毕竟还不能与以上两类音乐平起平坐。而就这两大类而言,也不可以等同。乐器声要比歌唱声丰富得多;因为乐器的种类很多,可以不下几千种,而人声则只有有限的几种,即男声女声的高、中、低音,以及童声、假声等;乐器的音域比人的音域宽得多,人的男声频率约从 100Hz 起,女声频率约从 180Hz 起,加上泛音,最多到几千 Hz,可是乐器可以有多个八度,最大的管风琴可以有九个八度,从不到 10Hz 到 1 万多 Hz,加上泛音可到 18000Hz;乐器的演奏强弱可相差几千倍,而人声不能;大的管弦乐队合奏可以有十几个声部,而唱歌同时最多只有几个声部。乐器的音色更是丰富多彩,当代的数字合成音乐可以产生任何音色,而人声的音色毕竟只能在一定范围之内变化。

从作用上来说,乐器可以单独演奏,也可合奏或作伴奏。伴奏的作用是烘托主题,传达感情,保持音准,连接乐段,加强节奏,丰富和声等。在小合唱中,伴奏还可以起"指挥"的作用。

乐器发出的音响各有个性:有的奔放、激越,有的含蓄、低沉;有的甜润、细腻,有的粗犷、洪亮;有的委婉、如诉如泣,有的高亢、坚定、挺拔;有的随和、合群,有的却难以与之为伍……例如黑管的适应性很强,在各种乐队如军乐、室内乐、爵士乐等中都可以用;它可以表现各种主题,各种风格,塑造各种音乐形象。黑管的音色很"合群",与小提琴、长笛、双簧管、大管、圆号、竖琴、长号、鼓等都能合作得很好。双簧管则音色甜美,有田园风味,如贝多芬的《田园交响曲》的第一句,就用双簧管奏出,一下子就把人带进了乡村大自然的境界中去。大管象老爷爷说话。小提琴是乐器中的皇后,它华丽、灵活、温柔、纤细,但如果与打击乐,同鼓、小号在一起,就没有声了,或者得有几十把同奏才能与之匹敌。大提琴深沉、浑厚,如用以表示"黄河"的主题,而在柴可夫斯基的"徐缓如歌"中,则是如诉的悲歌,把人带入深思的境地。小号往往盛气凌人,明快嘹亮,表现行进和凯旋,但也可以吹得相当甜美,加上变音器后也可以是怪声怪气。大号笨拙,声音与其形状相像。圆号与木管也可协调,木管五重奏里常常包括圆号。唢呐和板胡则挺拔,热闹,但不合群。二胡委婉、伤感,擅长表现《二泉映月》和《江河水》等内涵。打击乐是乐队的"心脏",节奏性强的音乐多用打击乐,现代摇滚乐,迪斯科等中,打击乐更是基石。打击乐在乐队中实际上还起指挥作用,如果打击乐一不在点上,乐队就乱了。大的管风琴音色丰富,音量宏大,

演奏起来可以震动整个音乐厅，甚至一个城市都听得见。钢琴是乐器之王，音域广，和声丰富，共鸣好，表现力强。竖琴音似流水，常常象征纯结平和。电子乐器则总有“电味”。各种乐器的这 些个性是有其物理基础的，即与材料、结构有关，也同演奏有关。

7.1.2 对乐器的一般要求和乐器的一般性质

作为一件乐器，首先应让人在生理上是可以拿得起、吹得动、可操作的，并在听感上是悦耳的，或至少是不难听，在工艺上是可以制作的，或再加上经济上是可以承受或商业上是可以获利的。

排除了与上要求相悖的不可实现的因素之后，还要考虑的是音乐方面的要求，即音的高低、强弱、长短和音色。

1)音的长短，要求是好控制，这一般较易做到。

2)关于音的高低，要求乐器首先要有相对的音准。

音的高低范围就是音域。乐器要求有一定音域。一般乐器的音域是固定的，有的乐器的音域可以扩展，如笛子的超吹，提琴的泛音，或如多排簧的手风琴，改变变音器，实际发音可以有八度的上下移动。

有的乐器每个音的音高固定，如钢琴等键盘乐器。有的乐器的音高可以随意变化，或连续变化，如许多弦乐器及管乐器。

有的乐器还可以同时发出两个以上的音。除了键盘乐器之外，笙也可以同时发出双音。

3)每种乐器都有一定的音色。作为对乐器音色的一般要求，首先是要像这类乐器，如二胡就不能出“吱吱扭扭”的声响，小提琴不要有“狼音”，木琴不能只听得见击木声，钢琴、长笛的击键声不要盖过了乐音等。

许多乐器的音色大体是固定的，即与演奏关系不大，如钢琴、风琴、电子琴等。有不少乐器的音色在一定范围内可以变化：如弦乐器改变演奏弓法，连弓与跳弓可有不同音色；改变指法，以及同一音用拉奏或拨奏就有很大不同；改变演奏部位，近琴马或近指板有很不同的音色；胡琴改变琴码大小、形状或位置，听感就有很大差异。管乐器加不加变音器或加不同的变音器，音色可变化很大。现代的电子合成器(Synthesizer)则几乎可以产生任何音色。

4)乐器要求有一定音量，并有一定强弱变化，而且是可控制的。有的乐器如管风琴、钢琴，本身音量大，可控制的强弱变化也很大；而二胡、长笛等音量较小。低档电子乐器的声音“木”，原因主要是其强弱不能随击键力度而改变。

7.1.3 乐器与音乐家

每件乐器都有自己的“个性”，演奏家必须用本人的专用乐器，才能得心应手，找到“感觉”，换一件就不好。乐器还可按个人的的要求调音、调律。演奏家与乐器常常是融为一体的。

作曲家也离不开乐器，好的乐器会给作曲家灵感。因此，作曲家、乐器制作师、演奏家往往是三位一体的。

乐器除了音乐功能之外，还是一件艺术品，并且，外观的美也与声音有关，这是乐器制作中所必须考虑的。

7.1.4 乐器的基本结构

乐器是制造音乐声的机器。它最终总是使空气发生振动并传入耳朵。乐器一般由以下几

部分构成：

1)发声体。包括起振部分，即弦乐器的琴弦，管乐器和手风琴的簧片，铜管乐器中人的嘴唇，打击乐器中的膜板等。有的乐器还包括耦合部分，即发出声的高低除了取决于发声体外，还取决于耦合体，如管乐器的管，木琴、钟琴下面的管等。

2)传导体。如琴码、音柱、音梁等，它把发声体发出的振动传给共鸣体。

3)共鸣体。有的乐器发声体的振动小，光靠它发出的声音甚至听不见，要靠共鸣器才有听觉效果，如提琴的琴箱、共鸣板，古七弦琴的共鸣弦等。

4)支持体。如大提琴的支杆。钢琴的钢板，既起支持作用，又起共鸣作用。

5)附件。可以把风箱、指板、背带、鼓锤、指拨、琴弓、弦轴等都看作乐器必要的附件。

7.1.5 乐器与物理

乐器的发声原理、结构、分类、制造、测试、维护等无不与物理学有关。

1)乐器的发声和传播涉及物理学中的振动与波、流体力学、固体力学。电子乐器的发声出于电振荡或数字电路。电声乐器是靠电子电路放大和调控传播音乐的。

2)乐器的结构设计中有"气路"，如笛孔；有"气阻"，如小号；有"张力"，如琴弦；有"强度"，如琴箱和琴弦、钢琴的钢板；还有钢琴的击弦点以及声电模拟，力电模拟等。

3)乐器的分类应根据振动机制来区分。

4)材料的性能，如弹性模量、刚性、密度、干燥度、传声性，材料的物理处理，如烘烤、上保护漆、加湿以及加工等许多都是物理方法和物理属性。

5)乐器的测试仪器。包括材料、加工过程中的测试，音高、声强、时值、瞬态、频谱等许多是用物理仪器进行测试的。

6)研究乐器的方法，如客观激励方法，激光全息方法等都是物理方法。

7)乐器的维护，如保持一定的温度、湿度等，常常就是保持一定的物理环境。

8)就其实质来说，乐器本身就是一件物理声学仪器。

4

7.1.6 乐器的声学参数

乐器有许多性能指标，如外观、手感等，但主要的是声学参数。用以表示乐器声学性能的参数时各种乐器，特别对不同档次的乐器，要求是不同的。主要的有如下一些。

1)表示音的高低的有：

a. 音域。这是指乐器发声基频的范围，有时以音名表示，如标准钢琴从 A0—c^5，有时以频率表示，如钢琴从 27.5～4186Hz，也有时以几根弦的空弦音高表示，如小提琴有 g^1、d^2、a^2、e^3。

b. 音准。即允许音高误差。有绝对音准和相对音准。绝对音准是指与标准的绝对音高容许差多少？相对音准是指两音间的音程与标准的音程允许差多少？一般以音分表示。目前最高的标准是容许差 2 音分。

c. 音准的稳定性。包括演奏过程中，各种因素对乐器音高影响不能超过规定的音分。

d. 音高的可调性及可调范围。弦乐器是按规定的音高定弦。有的管乐器可以通过改变管长调节音高，有的电子琴或合成器可以在±50 或±100 音分范围内连续或以 1 音分步进整体调整整个琴的音高或调整各个键的音高。

2)表示音强弱的有：

a. 音量。这方面一般没有定量的指标。有的电声乐器以最大不失真功率表示，这是间接的

表示。也有以在一米远处的声压级表示。但这些一般不作为定量的指标。

b. 动态范围。即声音强弱或音量的变化范围。这常常也没有明确定量的指标，但是在挑选乐器时是必须要试听的。

c. 激发阈值。即使乐器发出正常的乐音所需最小的激发力。这是有客观指标可依，也可测试的。

d. 指向性。这是指声音的强弱按不同方向的分布。

e. 衰减和传远。一个乐器发声停止后，就地能延迟多少时间，余音才消失，这是声音的衰减特性，是指音量随时间的变化。一般传统乐器都有一定的衰减时间，有长有短，如钟声就衰减很慢。传远是指音量随距离的变化。在房间里或者就近听钢琴和手风琴演奏声音都很响，但在远处只能听到钢琴的声音。电子琴当激励停止后立即"嘎然"而止，即衰减很快，听感就不好。不同频率的谐波成份有不同的衰减情况，会形成不同的音色。

3)表示音色的有：

a. 频谱。迄今为止，一般认为频谱是表示音色的主要标志，也叫静态音色。

b. 瞬态状况。研究表明，音头、音尾的不同会导致音色的很大不同。这也叫动态音色，前述的衰变情况也可反映音色的不同。

c. 频率响应。主要是乐器共振峰的位置、强弱和多少。

4)表示时值的有：

a. 发音灵敏度，即受到激励后发声的反应时间的长短，这一方面是可以测定的，同时也可以凭听来"感觉"。一般说来，直接激励发音体的乐器，如提琴、木琴、鼓、钗等，这个问题不大；键盘乐器则有这个问题，有键盘深浅的问题，有"跟得上"或"跟不上"的问题。

b. 上述的衰减、瞬态情况等实际上也包括了时间特性。

7.1.7 乐器的四要素，乐器声学的内容

乐器声学讨论乐器发声物理基础，物理条件及其材料、结构、工艺和演奏与其声学效果之间的关系。所谓声学效果，包括客观的声学性能和主观的听感(Sensation of Hearing)两个方面，而最终还是体现在音乐声四个主观量上面。

我们把乐器的材料、结构、工艺和演奏称为乐器的四要素，这四个要素与音乐声的四要素之间的关系就构成了乐器声学的全部内容。用一个框图来表示乐器声学的内容，见图7-1。

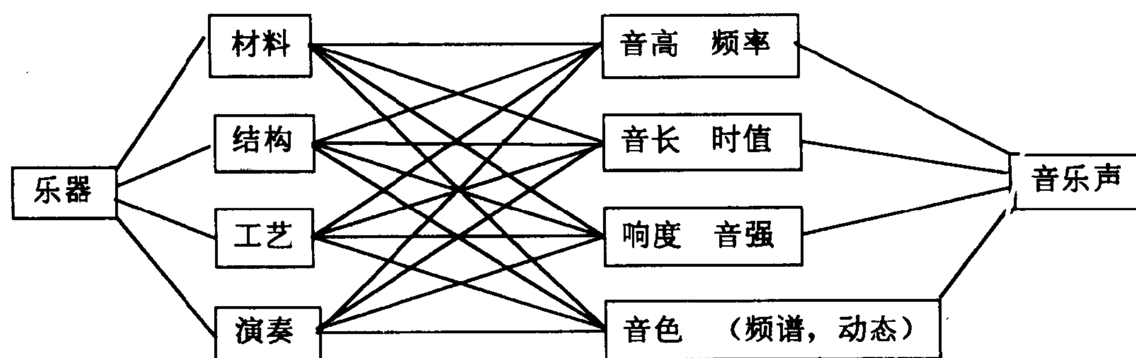


图7-1 乐器声学的内容

§7.2 乐器的分类

下面，我们就分别对不同种类的乐器对这些问题一一予以讨论。本章中主要讨论的是传统乐器，关于电子乐器的进一步的内容我们将放在《音乐电声》一章中去讨论。

曾经有过各种各样的乐器分类方法。至今有的乐器如何归类还有争议。下面简单地介绍几种分类方法，同时提出本人认为最科学的方法。

7.2.1 乐器分类的原则

乐器的分类应该遵循以下几个原则：

1)科学性。这是首先的，要有一定的依据，一定的线索，而不是混乱的；

2)从俗。要考虑到历史发展至今以及习惯因素，不要完全另成一套，以免不好普及和被认可；

3)能把所有的乐器都包容在内。即不论是古今中外，欧洲或非欧体系的乐器都能归在这种分类法中。

7.2.2 按材料分类

我国古代的“八音齐奏，音调清和”和“八音迭奏，无相克谐”中的“八音”是按制作乐器的材料分类的。

1)金：用金属、当时主要是青铜制作的乐器，如钟，錞(Chun)于，(一种上大下小有舌吊挂摇响的青铜乐器，或叫錞，如图7-2)，（即大钟)，铙，钹等。

2)石：用玉、石制作的乐器，如磬，这是最早的乐器之一。

3)土：用陶土制作的乐器，如缶，鹅卵形，上有吹孔，旁有按孔的土制乐器，如图7-3。缶，即土罐子。我国古书记载有“鼓盆而歌，鼓缶而歌。”1980年12月17日《青海日报》报导我国首次发现“土鼓”，(即“陶鼓”)，如图7-4(a)所示。5个较完整的土鼓的上底径$\varnothing_1\approx$9.5～16.8cm，中腰$\varnothing_2\approx$5.5～9.0cm。下底径$\varnothing_3\approx$17.0～25.0cm，耳环径$\varnothing_4\approx$1.3～2.0cm，高是h$\approx$9.0～17.0cm。此外，我国许多省分都出土过圆形、锥形或盒形的内装砂粒、石头、陶丸的“响陶器”(图7-4(b))，也应看作是一种土制乐器。



图7-2 錞于(錞)

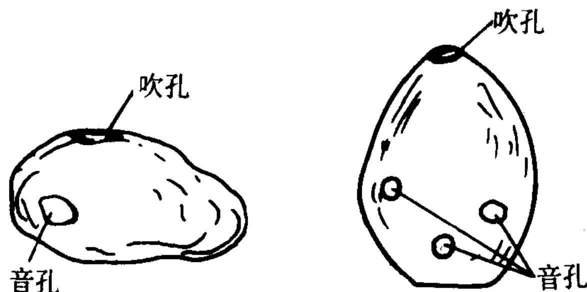


图7-3 缶

4)革：鼓。用兽皮制作的乐器。《诗经·大雅》有"鼍(tuó)鼓逢逢(Pēng)，朦瞍奏公"，鼍鼓即扬子鳄的皮制成的鼓。

5)丝：是弦乐器，当时已有弹弦乐器，如琴、瑟，有七弦至十弦琴，瑟有更多弦，人称"琴瑟友之"。秦有"秦筝"，长方形，源于瑟，曾侯乙墓中曾出土五弦筝，后发展到更多弦。"渐离击筑"的"筑"是一种似筝的乐器。

6)木：木制的乐器，如柷(Chù)，，呈方盒形，像梯子。敔(Yǔ)，似伏虎形，背有齿，用一根棒括刷出声。有"乐之初击柷以作，乐之将末，戛(jiá)敔以止之"。

7)匏：是葫芦瓢，如笙、竽等，二十管以上叫竽。

8)竹：竹制乐器如管、管子。篪(Chī)，是一种横吹的管乐器，即今笛子。古时的笛是竖吹的即今箫。还有龠(yuè)，是排竹，一种最早的伴奏乐器，有"午羽吹龠"、"土鼓苇龠"之记载。

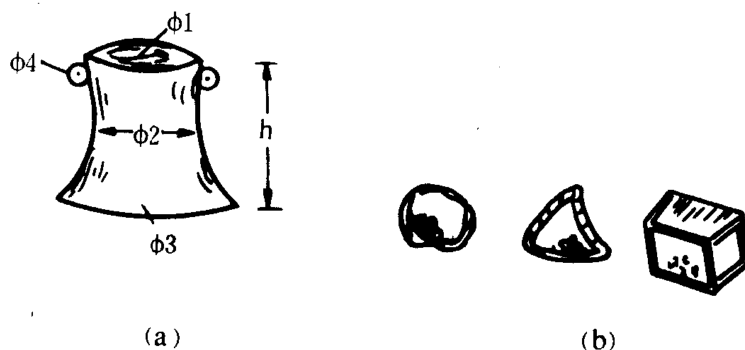


图 7-4 (a)土鼓(b)响陶器

实际上，还应有一类"骨"，即用动物的骨头凿孔而制成的乐器。八十年代后期河南出土的骨笛即是。

现今已不用这种乐器分类方法，但流传至今，有"弱管轻丝"、"金石之声"、"琴瑟相和"、"滥竽充数"、"江南丝竹"等说，并常在语言、文学著作中出现。

7.2.3 按演奏方法和演奏机制分类

这种分类方法不严格，但迄今在国内还常有此说，是一种描述性的说法，不用于严格的分类，如：

1)吹奏乐器，这一般是指西洋铜管、木管类乐器；

2)拉弦乐器，指西洋乐器和民族乐器中的弓弦乐器；

3)弹拨乐器，这一般是指拨弦发声的民间乐器；

4)敲打乐器，这主要在民间乐器上讲，常指打击乐器，也包括击弦乐器；

5)吹打乐器，这是吹奏和敲打乐器的合称；

6)键盘乐器；等。

7.2.4 按发声体分类：

按乐器发声体的区别分为：

1)体鸣乐器(Autophone-Instrument 或自鸣乐器)，如锣、梆、钟、铃等，靠自身振动发声；

2)气鸣乐器(Blassi-Instrument),如笛、单簧管、双簧管、以及哨、铜管乐器等,靠乐器内空气柱的振动发声;

3)膜鸣乐器(Membran-Instrument),如鼓,靠乐器的皮膜振动发声;

4)弦鸣乐器(String-Instrument),如琵琶、胡琴、钢琴、提琴等,靠弦振动发声。

7.2.5 按用途分类:

按乐器的用途分类,有管弦乐器(Stringed Instruments and Wind Instruments)、伴奏乐器(Accompany Instruments)、军乐器(Military Band Instruments)、行军乐器(Marching Band Instruments)、室内乐器(Chamber Music Instruments);宫廷乐器(Court Instruments)、民间乐器(Folk Instruments)、信号乐器(Signal Instruments)、狩猎乐器(Hunting Instruments)、宗教乐器(Ritual Instruments)、生活乐器或民俗乐器(Living Instruments)、家庭乐器(Domestic Instruments)等。

7.2.6 按发声的物理机制分类

这是现实中最常见的乐器分类方法。交响乐队中的管乐、弦乐和打击乐三个声部基本上是按此分类的。如果细分,还可以有:

1)擦弦乐器(或弓弦乐器、拉弦乐器)(Friction Chordophones)。顾名思义,这是靠弓与弦相摩擦而发声的乐器,按弦的固有频率发声,是一种柔弦乐器。其特点是谐波多,中、低频强,声音连续、和谐,谱线等距,等时衰减。每个声的前沿有摩擦噪声,是白噪声(频谱见图 7-5)。提琴家族是典型的擦弦乐器。中国的二胡、京胡、马头琴、板胡、坠胡等也是擦弦乐器。

2)弹弦乐器(或拨弦乐器、弹拨乐器)(Plucked Chordophones)。这是靠手指或拨子等触拨弦而发声的乐器。拨弦后,弦产生振动,按弦的固有频率发声。这也是一种柔弦乐器。其特点是谐波多,但不如提琴等弓弦乐器,即比擦弦“硬”些,谱线上移时高次谐波的距离逐渐分开,谐波衰减不等时。每个声开始时有拨弦声,是一个直带(图 7-6)。吉他、竖琴是典型的弹弦乐器,还有曼陀林等。我国的琴、筝、阮、箜篌、月琴、琵琶、冬不拉、热瓦甫等也是弹弦乐器。

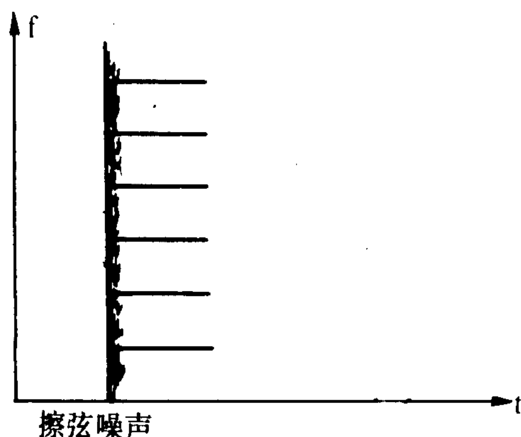


图 7-5 擦弦乐器谱

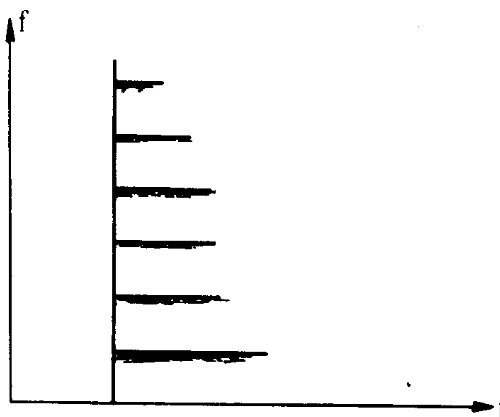


图 7-6 弹弦乐器谱

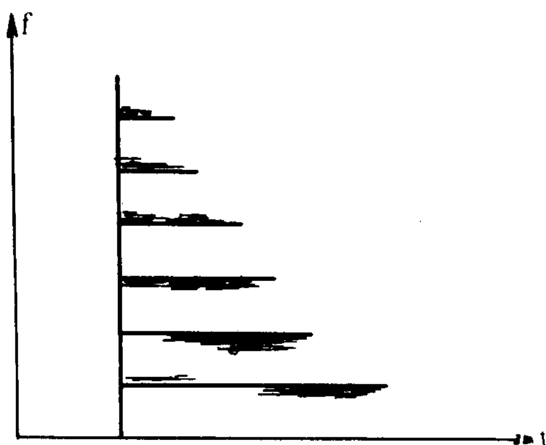


图 7-7 打弦乐器谱

3）打弦乐器（或击弦乐器 Struck Chordophones）。这是靠锤子等物体敲击琴弦而发声的乐器，弦被敲击后按其固有频率发声。打弦乐器不同于以上两种柔弦乐器，是刚弦乐器。其特点是谐波中分音多，高次谐波频谱也逐渐拉开，不同时衰减，高次谐波频谱衰减快，是一种混合谱。有音头，起始击弦时音较强（图 7-7）。如大洋琴、扬琴等。

4）无簧管乐器（Nonreedy Pipe Instrument）。笛类和铜管乐器都是无簧管乐器，按管长发声。但这两类有明显差别，听感也不同。笛类靠边棱起振，其谐波不多，高次谐波弱，谱线等距，等时衰减，音头有吹风噪声（图 7-8）。长笛、短笛及中国的箫、笛都是这类无簧管乐器。铜管乐器是震唇乐器，即靠嘴唇作簧起振，如军号、小号等，其高次谐波强，所以声音尖锐、嘹亮。

5）有簧管乐器（Reedy Pipe Instrument）。单簧管、双簧管、巴乌等都是有簧管乐器，它靠簧片起振，按管长发声。其特点是谐波丰富，不同时出现，不同时衰减，低次谐波丰富，声音渐起。频谱有特征区，这个频段里的谐波特别强（图 7-9）。

6）簧振乐器（Reed Instrument）。簧振乐器按簧片振动的频率发声，有明显音高。其特点是谐波不多，强度弱，听起来单薄，如口琴、手风琴、八音琴、竹簧（图 7-10）、铁叶簧（图 7-11）、口弦（图 7-12）等。

还有一些乐器是一簧一管，簧管耦合发声，但以簧发声决定音高，管起稳定音高的作用，我们也把它们列入簧振乐器，也叫簧管乐器，如中国的笙、管风琴中的簧管等。

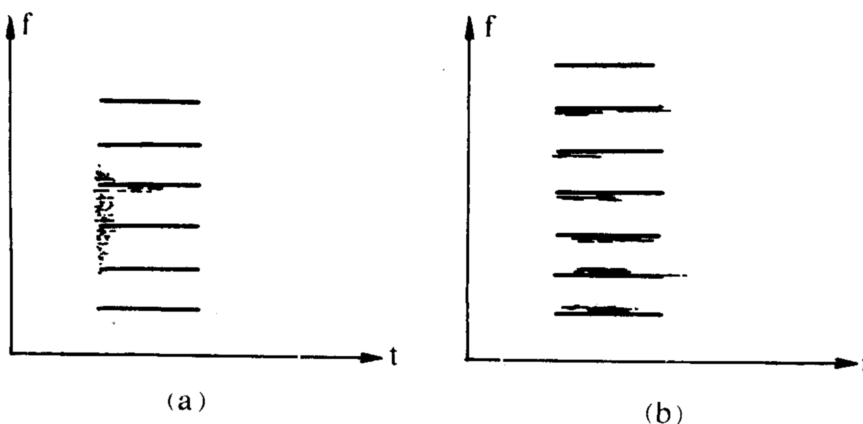


图 7-8 无簧管乐器谱(a)笛类(b)铜管

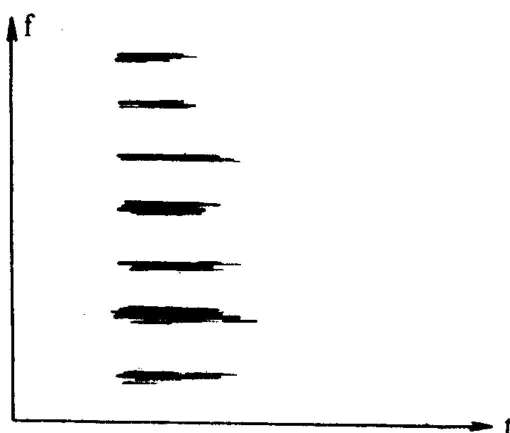


图 7-9 有簧管乐器谱

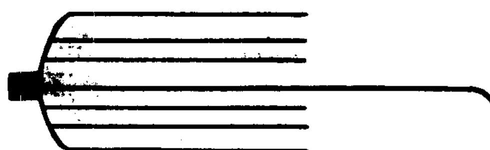


图 7-10 竹簧

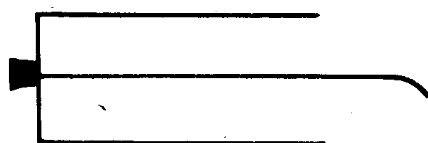


图 7-11 铁叶簧

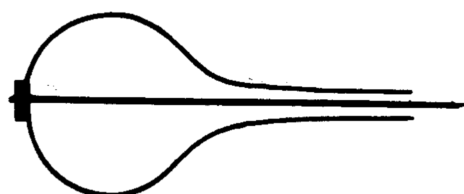


图 7-12 口弦

7)膜板乐器(Membranes and Plates Instrument)。膜板乐器靠膜板被敲击后振动发声,实际上包括膜振乐器、板振乐器和体振乐器。按振动的情况特性,簧振乐器也是一种膜板乐器,但其振动"膜板"是自由簧片可以说是一种"软"膜板乐器。膜板乐器的特点是有时没有固定音高,如锣、鼓;有时有近于模糊的音高,如木鱼、梆子;有时有音高但不非常明显,如云锣、定音鼓;有时有明显的音高,如钢片琴、铝板钟琴等。膜板乐器的频谱一般是连续的,都有连续的音头,不和谐,有的有着色的噪声谱,少数的如钢片琴有谐和谱。图 7-13 中(a)是敲木头的冲击噪声,(b)是有两个共振峰的木盆敲击声,(c)是定音大鼓,(d)是金属棒敲击谱,有不甚清楚的谐和谱,(e)是完全不谐和的厚板、铃声,(f)是锣鼓谱。钢锯(Singing Saw)是一种特殊的膜板乐器,亦叫锯琴,它用提琴弓拉奏,用改变其长短、弯曲程度及拉锯位置而发出不同的音。

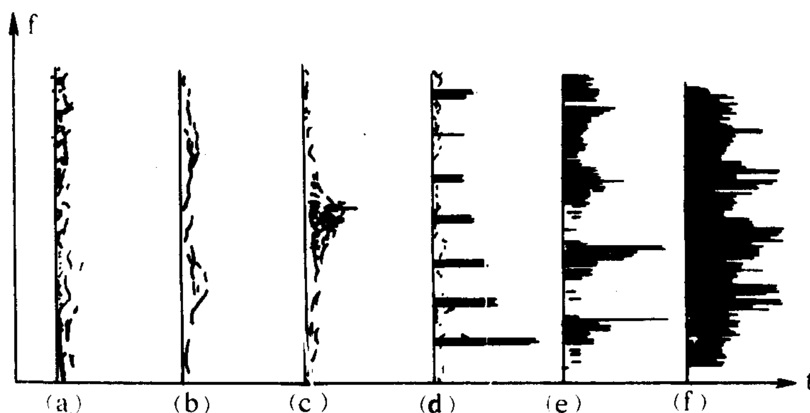


图 7-13 膜板乐器谱

8)电子乐器(Electronic Instrument)。按电振动的频率发声的乐器是电子乐器。电子乐器已成为乐器中的一个新的大类,将在第九章专门讨论。

§7.3 弦乐器

7.3.1 弦的振动方式

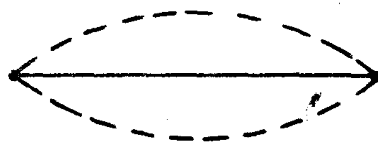


图 7-14 弦的横振动

弦乐器有四种振动方式,分述如下:

1)横振动(Transverse Vibration)

弦乐器的弦,受与弦长垂直方向的力的激励而产生横振动。横振动是弦乐器最主要的振动形式,弦乐器弦发声的主要能量是由横振动提供的,横振动在弦上形成驻波,如图 7-14 所示。

弦的横振动的基频为:

$$f_{ot}=\frac{1}{2L}\sqrt{\frac{T}{\rho_l}} \tag{7.1}$$

公式(7.1)中 T 是弦的张力,ρ_l 是弦的线密度,L 是弦长。公式(7.1)假定弦无限长,无限细,在横振动中 T、ρ_l 和 L 不变,即包括弦在振动时不伸长,因此,只有在小振幅振动时成立。由上可知,弦越短,张力越大,弦线越细,则其基频越高。频率 f_{ot} 与材料的弹性模量无关,即对肠弦、钢弦、尼龙弦都适用。当然,对于各种材料,T 和 ρ_l 是不同的,表现在弦的粗细不一样。

由公式(7.1)可见,改变弦的张力可以改变音的高低。钢琴、提琴等各种乐器的调弦定音都是这个道理。例如,有一种竖琴的踏瓣可以变调,其原理如图 7.14 所示,用踏瓣控制两个转轮 A 和 B,A 和 B 上各有一对凸出的挡杆 a 和 b。当没有踩变音踏瓣时,弦线正常,如图 7-15(a)所示;当踩下一个踏瓣时,A 转过一个角度,通过 a 把弦拉紧,如图 7-15(b)所示,于是这根弦升高半音;当再踩下一个踏瓣或把踏瓣继续往下踩时,A 和 B 都转过一个角度,a 和 b 把弦更加绷紧,如图 7-15(c)所示,可以提高一个全音。

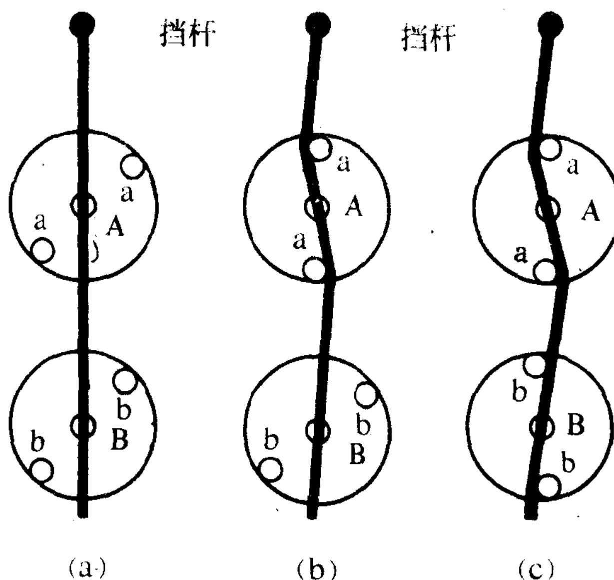


图 7-15 竖琴变调机制

公式(7.1)也说明了，吉他、小提琴等可以用一种"移调器"，把它夹在弦上的一定位置，可以把调移高，这是把弦长 L 变短，基频 f_{ot}变高了。实际上，用手指按弦的不同位置，奏出不同音来，也是改变有效弦长 L 的缘故。

公式(7-1)还可以说明，弦乐器的低音弦粗(ρ_l大)，高音弦细(ρ_l小)。

弦的横振动中谐波的幅度与频率的序数成反比。例如：

谐波序数	1	3	5	7
谐波振幅	1	1/3	1/5	1/7
谐波能量	1	$(1/3)^2$	$(1/5)^2$	$(1/7)^2$

可见横振动中的能量以基频为主。

2. 纵振动(Longitudinal Vibration)

对弦乐器的弦激发起振动的，事实上不仅有与弦长方向相垂直的力。由于各种各样的影响，例如拉弦，不可能绝对的与弦垂直而没有斜的成分，因此，总会有键向力，产生弦的纵振动。如图 7-15 所示。

弦的纵振动的基频为：

$$f_{ol}=\frac{1}{2L}\sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{7.2}$$

E 是制作弦的材料的杨氏模量，L 是弦长，ρ 是材料的密度。由此可见，弦越硬，即 E 越大，则 f_{ol}越高。

拉弦乐器的斜弓有明显的纵振动的成分，拨弦乐器次之，打弦乐器更少，但横振动的基频 f_{ot}不变。因此，不管你如何改变拉弓的方向，不会随你手势的变化而改变音高。但是，变化拉弓的方向会影响纵振动的成分的多少，因此会影响音色。而不同材料的弦的 E 和 ρ 不同，因此纵振动的成分不同就会有不同的音色，或说肠弦、钢弦、尼龙弦的音色有别在于纵振动。

3)扭转振动(Torsional Vibration)

琴弦受到扭转力矩时，产生扭转振动。如图 7-16 所示。拉弓或弹拨琴弦时，弦同时产生扭转，于是产生扭转振动。扭转振动的基频为：

$$f_{or}=\frac{1}{2L}\sqrt{\frac{G}{\rho}} \tag{7.3}$$

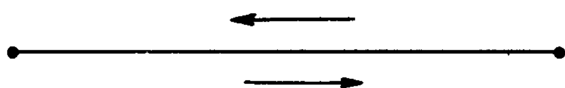


图 7-16　弦的纵振动



图 7-17　弦的扭转振动

公式(7.3)中 G 是弦材料的刚性系数。由公式(7.3)可见，f_{or}与 T、E 无关。

扭转振动的作用也是调节音色。打扬琴没有扭转振动，相对于弦乐器来说较为单调。钢琴虽没有扭转振动，但它以整体的共鸣、耦合而丰富了它的音色。

4)倍频振动(Double-frequency Vibration)

弦作横振动一次，固定弦的模板往返振动两次(图 7-18)，于是出现二倍频，亦即倍频振动

是同横振动同时出现的。竖琴琴弦下端牵在共鸣板上(图 7-19),倍频振动最为明显。倍频振动也起改变音色的作用。

以上几种振动方式常常是同时产生的。横振动必然会同时引起倍频振动,也可能引起纵振动。弦乐器的弹拨奏法兼有四种振动,因此技法是最丰富的。

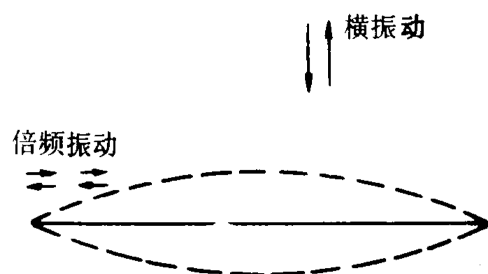


图 7-18 弦的倍频振动



图 7-19 竖琴

这几种振动的声谱如图 7-20 所示,(a)是横振动,是主要的振动,是决定基频的音高的。(b)是纵振动。(c)是扭转振动,(d)是倍频振动。(c)和(d)都很弱,会使振动频率模糊。(e)是弓的遏阻声。(f)是以上几种因素总合的效果。

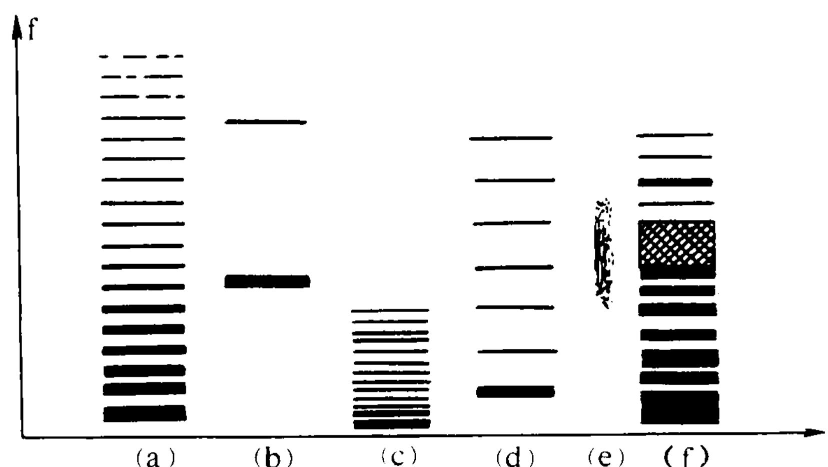


图 7-20 弦振动谱

7.3.2 琴箱与弦的耦合

许多弦乐器,如果仅仅是靠弦本身作微小振动,带动空气振动传声,是几乎听不到声音的。

要靠琴码把振动传到琴箱上去。这时琴箱的振动已经是一种放大了的耦合振动。琴板太软或太重都不行。太软了振不起来，太重了则被压住了。

琴箱本身有声谱。小提琴的面板(Top Plate)、背板(Back Plate)、指板(Finger Board)、系弦板(Tail Piece)都有各自的谱，别种乐器也是一样的。如小提琴的琴箱在500-800Hz之间有一个共振峰。这个共振峰并不均匀，也不宜把它匀平，因为这样产生的音色才显得有活力。图7-20中(a)是琴箱的谱，(b)是弦的谱，(c)是合起来的谱。

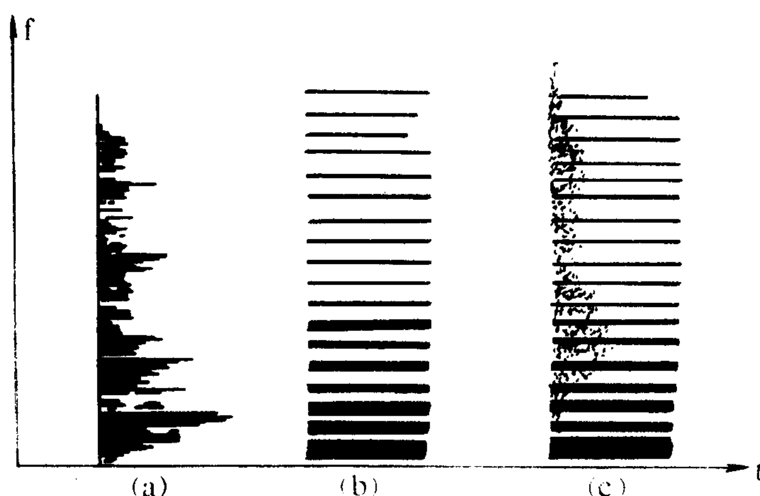


图 7-21 提琴振动谱

7.3.3 弦乐器的材料与音质

1)弦线的材料，一般有肠弦、金属弦和尼龙弦，丝弦现已少用，但有一些民族乐器还在用。

不同材料弦的音质不同，金属弦比较明亮。粗弦与细弦不同，粗弦增加不协和度，而细弦音质光彩。现在钢琴和提琴、吉他的粗弦用缠弦，即一根弦外边缠绕另外的弦，这样，增加了重量，但不增刚性，不至于一根弦太粗不好加工。

2)钢琴音板(Sound Board)的作用，是与击弦发出的声音产生共鸣，扩大空气的振动量，并使谐波丰富。优质的琴板要求传声快，各部分声波同步，声阻低而使能量的传输损失小，并有宽的共振峰，对不同音都有较均匀的共振。因此，音板用的材料是很讲究的。十二世纪时，意大利制钢琴音板用松木，后来用挪威的高海拔地方生长的云杉，北欧的银杉等。再后美国的白松、红松、黑松等也被广泛用于制造钢琴音板。

3)钢琴的击弦槌的材料也会影响音质。弦槌一般用毡子做成。硬的弦槌演奏时与琴弦接触时间短，发声尖、硬、亮；软的弦槌琴演奏时与弦接触时间长，抑止了谐波，声音发闷。

4)钢琴的琴架，自十九世纪起从木结构改用金属支架，加上用钢丝琴弦，大大改进了音量和音色。前几年“钢琴热”期间，有人想用塑料做“简易钢琴”，这从目前的条件看来是行不了的。

5)小提琴的面板、背板、指板等都有一定木质要求。背板要用枫木，面板要用杉木、云杉等，以纹路细、匀、顺者为好。一般至少要100-200年以上的成材。指板等则以乌木为好。另外对木纹的条数、间距的均匀、干燥度、动态弹性模量、密度等都有规定。

6)琴弓(Bow)的用木也有讲究，弓毛(Bow Hair)是以马尾的为好，而且有规定，如小提琴

弓用马尾直径为 0.161-0.198mm，含水率 15%，共 240-258 根。

7)胡琴的蒙皮可以用木板、蛇皮、甚至铁皮等，不同的蒙皮有完全不同的音质效果。蒙皮的干湿度也对声音影响很大。

8)其它如拨弦材料(手指、尖硬器)、击锤等都与音质有关系。

9)材料的处理亦会影响声学性质。如制作小提琴音板的木材，常用人工老化方法处理，如热处理、酸处理、发酵处理、氨处理、氧化处理、光处理、微波处理等。

7.3.4 弦乐器的结构与音质

1)弦乐器尺的大小当然会影响音高及音量。如理论计算，有 4 米长的低音提琴方可得到 16Hz 的基频。三角钢琴有大音板和琴箱，琴弦的张力也大，音量就大。

2)提琴等弦乐器中的音柱(Sound Post)被称为"魂柱"，它的作用是传导振动，支持共鸣器。音柱必须处于一定位置。小提琴的音柱在距离琴码(Bridge)右脚稍后处一定距离，太远会影响明亮度。音柱太粗有损光彩，太细则音色单薄。提琴还有低音梁(Bass Bar)，如图(7-22)。琵琶有三个音柱两个横梁。吉他有各种样式的横梁(图 7-23)。

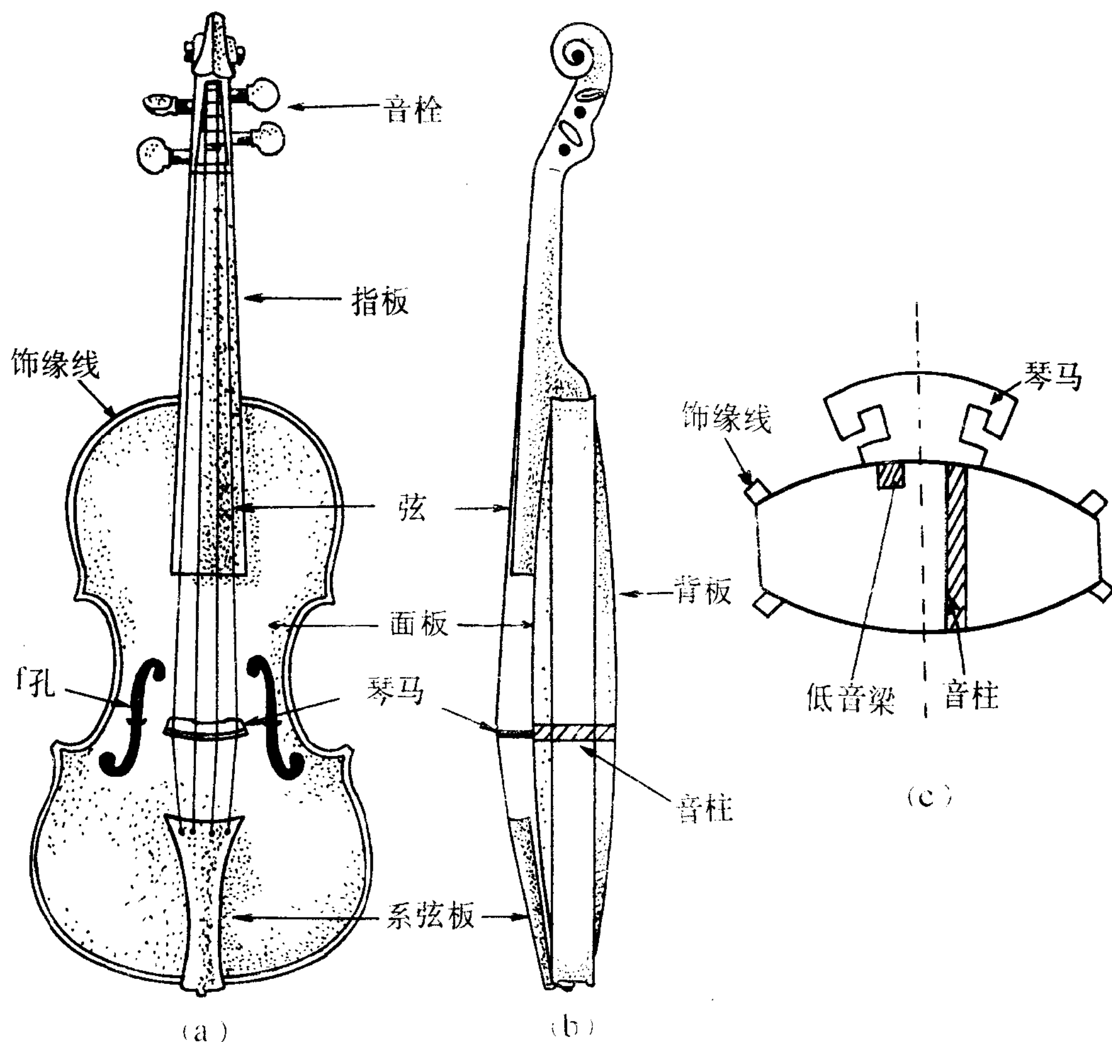


图 7-22 提琴的结构(a)正面(b)侧面(c)截面

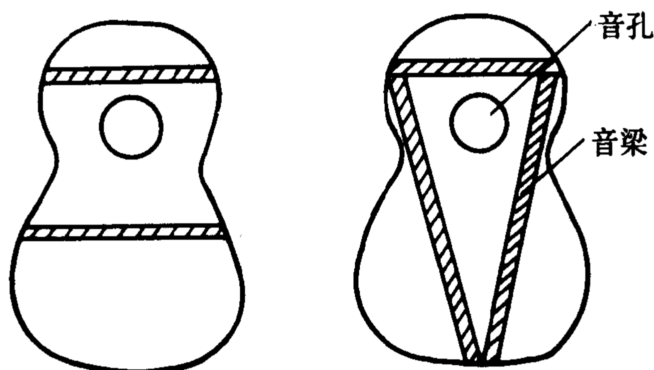


图 7-23 吉他的结构

3)弦乐器的音箱上的音孔除了有装饰作用以外,音孔形状、大小、位置,以及有无音孔,对于乐器的音质或音色是有影响的。如提琴是两个 f 形音孔,古阿拉伯的雷贝克(Rebec)是两个半月形弯孔,吉他的音孔是圆形的,中国的阮有两个小圆形音孔,而琵琶、月琴是没有音孔的。

4)提琴的饰缘线(图 7-22)可增强音量,改进音色,克制“狼音”。

5)琴码的形态、大小、厚薄也有讲究。琴码太小、太薄,声音不够浑厚,太大、太厚则声音缺乏光彩。“码脚”不能太薄,以免影响声音的传导,用铅笔当琴码会很不好听。在琴码上夹物体,则减少声音的传递功能,因此可作弱音器用。

6)提琴的琴头、琴角、音梁等也与音色有关。

7)弦的张力也会影响音色。因为张力大小会影响谐波的多少和能量。张力大,则声音亮;弦力小,则声音暗。如圣桑(Saint-Saëns,1835-1921)的《骷髅之舞(Dance Macabre)》中有一段小提琴独奏,把 E 弦调低半个音,虽按原调演奏,但有幽暗之感。所以琴弦不能任意定高或定低。

8)一般钢琴有两个或三个踏板(Pedal),一个是延音踏板,使声音延续,还有一、二个弱音踏板。

9)钢琴的击弦位置亦与音质有关。如击弦第的 1/7 处,这里成为波节,就没有七倍频了。我们知道,七倍频是 969 音分,是不协和的。有一种钢琴设计,低音击 1/7 弦处,中音击 1/11 处,高音击 1/16～1/24～1/36 处,都是与发声有关的。

7.3.5 弦乐器的制造工艺与音质

1)提琴胶合牢固与否直接影响振动模式。新琴太牢,振不起来,音色不好。

2)修补旧琴,会改变音色。现今有两种“修复”理论,一种是完全恢复这把琴制造时的音色,一种是把历来修补而改进的音色保存下来。这些都与工艺有关。

3)油漆起保护、防潮作用。底漆起填充作用,油漆填充入木纹,要求不妨碍振动,并可改善或改变音质。

4)安装音柱是一门高级技术,有时有“一着定天下”、“妙手回春”的作用。

5)许多弦乐器特别是弹拨乐器上有“品”,“品”的位置高低、适当与否,与音准、音质及弹奏方便有很大关系。有时,这是可以改进或修补的;有时,这是无可改变的。

6)古典的意大利琴，据说新的提琴演奏 10 年左右，要换一次音梁，以后就不再换了。

7.)制提琴的工序，也影响音质，有的(意大利派)先用模具，再加上琴角，粘上侧板，有的(萨克森派)不用模具上侧板；有的用铁钉，有的用木稍等，这些都影响音质。

8)弦乐器都有跑弦问题。除了结构本身以外，其中也与制作工艺有关，如缠弦柱过松，配合不好等，都会影响音质。

7.3.6 弦乐器的演奏与音质

传统乐器之所以有永恒的生命力，就在于它们的演奏方法和演奏技巧千变万化，随之奏出因演奏者的情绪和客观条件的差异而有无穷变幻的音乐来。目前一般水平的电子琴、计算机音乐等无可与之相比拟。

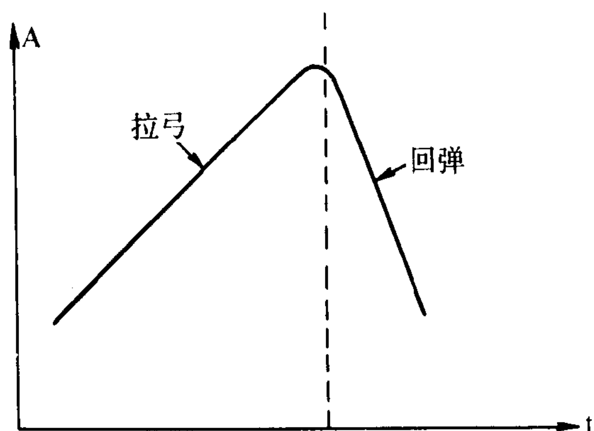


图 7-24 提琴弦的运动

1)拉弦乐器的弓法有：连弓、分弓、跳弓、飞跳弓等，指法有单音、双音、滑音、揉弦、拨弦、泛音等。不同的弓法、指法有不同的效果。

2)拉弓的过程是琴弓马尾上的“刺”，加上松香的颗粒“咬住”或“勾住”了弦，把弦拉到一定距离后又很快回弹(图 7-24)，成为一个接近锯齿状波形。因此谐波丰富(参看第六章声谱)。拉弓速度大时摩擦阻尼小，拉弓速度小时摩擦阻尼大，都会影响音色。

3)拉弓的位置关系也很大。正好在弦的 1/2、1/3、1/4 等处轻拉可以出泛音。还有近琴码奏法(Sulponticell)用于独奏，出玻璃金属色彩。瓦格纳(Wagner，1831-1883)的三幕歌剧《特里斯坦与伊索迪(Tristan and Isolde)》的第二幕规定了用近琴码奏法。近指板奏法(Sul tasto)用于弱奏，音呈羽毛状，犹如蒙上一层薄纱，德彪西(Debussy，1862-1918)的五幕歌剧《佩里亚斯与梅丽桑德》(Pelleas et Melisande)中有这种奏法。弓背奏法(Col Cogno)，有尖锐的金属音色，柏辽兹(Berlioz，1803-1869)的《家庭音乐会》(Family Concert)有这种奏法。

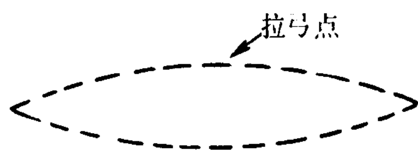


图 7-25 拉弓于弦中点

拉弓以后，弦振动的状况可以用以下方式作简单说明：

如果正好拉弓于弦的中点，则弦上各点作驻波振动，如图 7-25。如果拉弓于弦上某一点 A，则琴弦离弓以后的运动状况如图 7-26(a)-(h)所示，即弦的弯折点 A 会顺一个棱形外沿运动。这与上述拉弓位置恰好位于弦的中点时弦的振动状况是不同的，因此，有不同的波形和谐波成分，也就有不同的频谱，从而有不同的音色。拉弓的角度不同显然也会造成纵振动成分不同。

弓的压力大，出挤压声；压力小，出哨声。这也与扭转振动的大小有关。

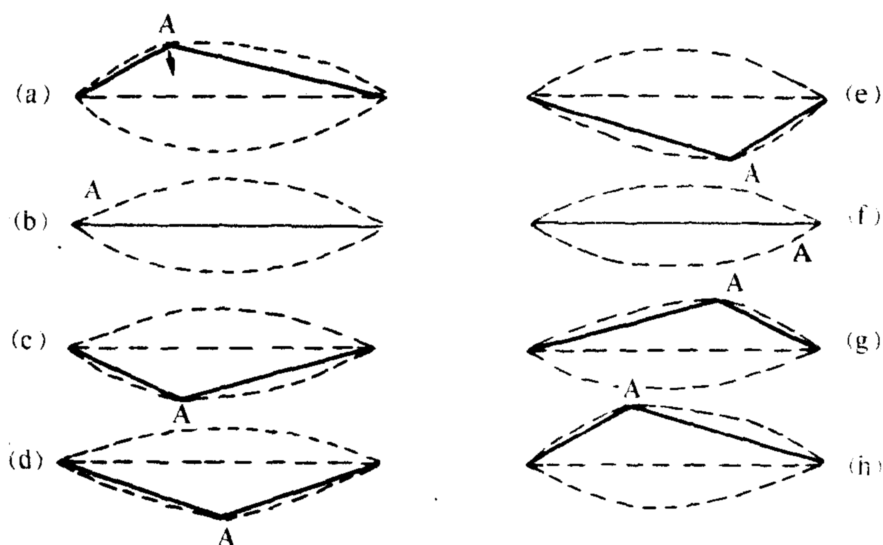


图 7-26　拉弓后弦的运动

4)拨奏的力量、速度、触点大小、用什么拨奏、及其拨奏位置等都与音质有关。

弦乐器拨奏以后，弦的振动状况如图 7-27 所示。当弦被拨支时，在拨点处把弦分为两段直线，如图 7-27(a)，然后，当松开手或拨板后，这个拨点朝两个方向运动，如图 7-27(b)、(c)…(g)所示。拨弦所产生的波形不像拉弦那样是锯齿形，弦受拨后产生的是矩形波，波的宽窄与拨弦的位置有关。如果拨点靠近弦码或弦头，则波形变得窄而密，高频成分就丰富。此外，拨弦会易于产生非谐的分音。

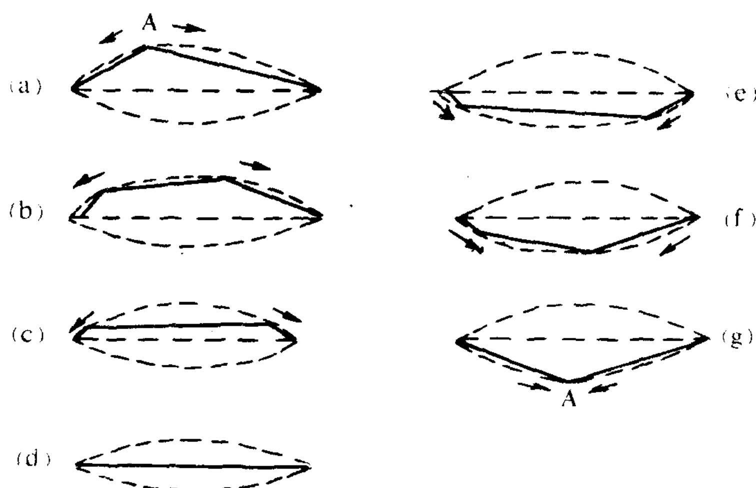


图 7-27　拨奏后弦的运动

5)二胡的弓序不同会有音差。这是由拉弓和推弓的压力不同而引起的皮膜凸凹不同而造成的。琴弓插入的角度也与音色有关。

7.3.7 提琴

提琴是古老的乐器，一说源自古阿拉伯的雷巴伯(Rebab)，传入西班牙后称为雷佩卡(Rebeca)，或说来自英国的克罗塔(Chrotta)。弦数从二弦、三弦、六弦到四弦。

1)提琴家族最常用的是小提琴、中提琴、大提琴和倍大(低音)提琴(Violin，Viola，Cello，Bass)，如图 7-28 所示。它们的音域及各弦的音高如下：

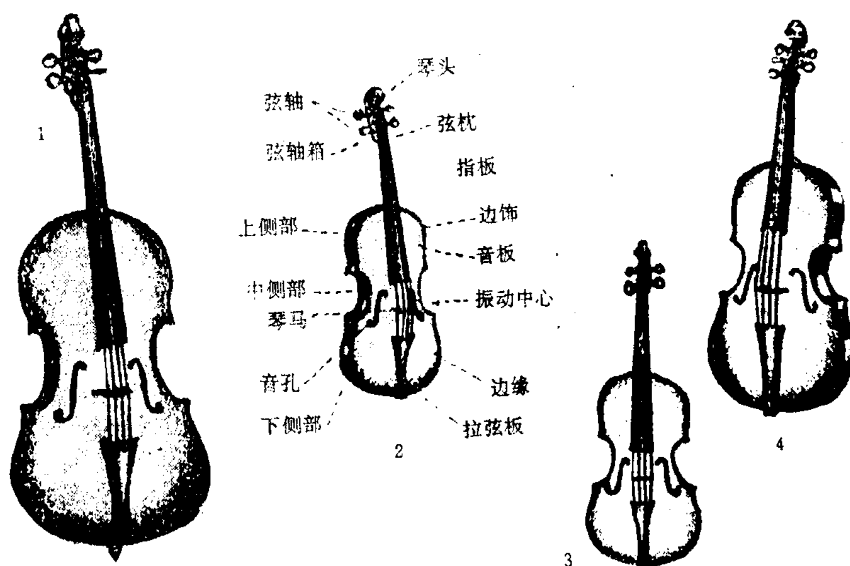


图 7-28 提琴

小提琴(弦长 60cm)				G3 (g)	D4 A4 (d^1)(a^1)	E5 (e^2)
中提琴(弦长 66cm)	C2 (C)	G2 (G)	C3 (c)	G3 (g)	D4 A4 (d^1)(a^1)	
大提琴(弦长 125cm)	E1 A1 (E$_1$)(A$_1$)	D2 G2 (D)(G)		D3 A3 (d)(a)		
倍大提琴(弦长 200cm)						
	C1 (C$_1$) 33Hz	C2 (C) 65Hz		C3 (c) 131Hz	C4 (c^1) 262Hz	C5 (c^2) 523Hz

2)小提琴各弦的频谱大体如图 7-29 所示。当然，每把琴都是不一样的。小提琴的谐波丰富而强，因此音色优美。G 弦的二倍频强于基频。

3)除倍大提琴外，提琴各弦间的音高关系都是五度，以便于准确调弦和用三个手指过弦。

倍大提琴因每弦上指间距离较大,各弦之间是四度关系。这样定弦也利于准确调弦。还有,以四度和五度关系定弦,因为是 2:3 的简单频率比,拉一根空弦时各弦之间有一定程度共振。

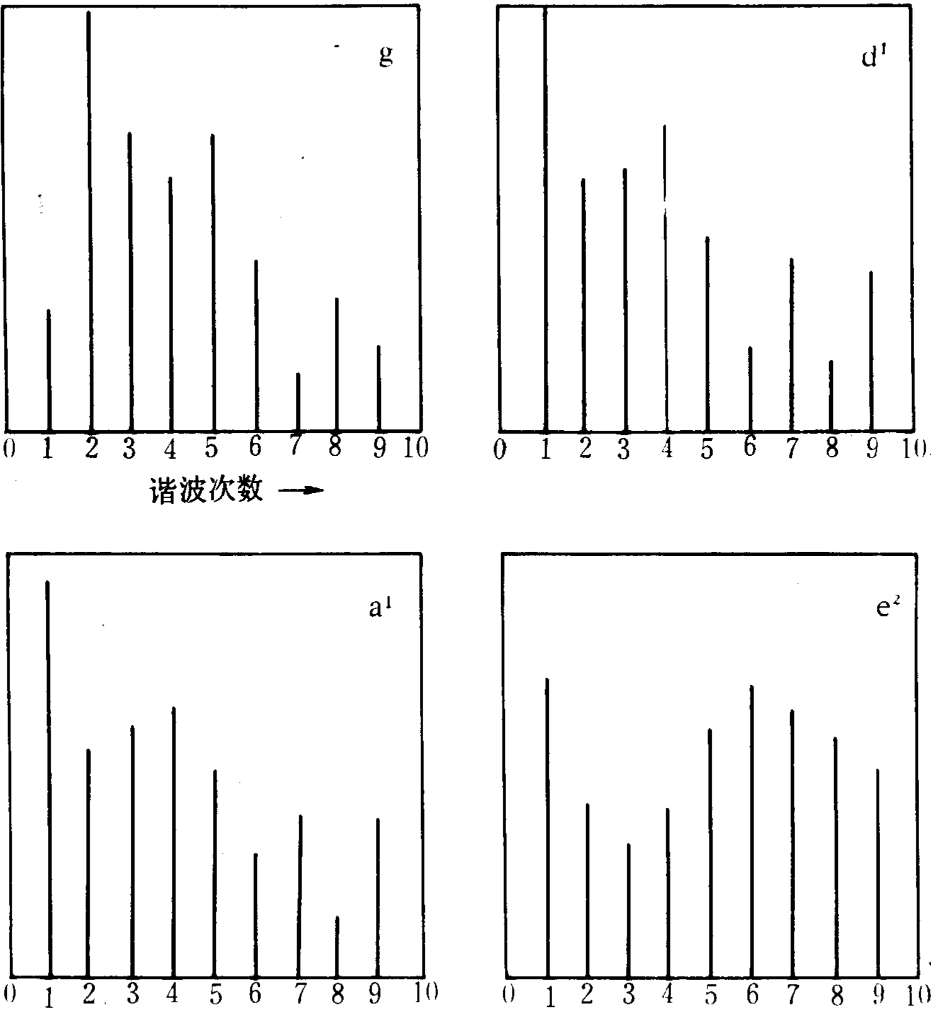


图 7-29 小提琴各弦的频谱

空弦的音色更容易得到发挥,因此许多著名的小提琴曲如贝多芬、柴科夫斯基和勃拉姆斯的小提琴协奏曲都是 D 大调的。

4)小提琴的琴箱是一个亥姆霍兹振子。

5)中提琴、大提琴和倍大提琴的频谱如图(7-31)所示。大提琴的 A 弦基频和三倍频最强。倍大提琴 D 弦的三倍频最强。6)1958 年,一位名叫卡林·霍金斯(Carleen Hutchins)的女人做了一套提琴,成为一个提琴家族,在原来的四种提琴之间又多插入几个琴:倍大提琴与大提琴间插入 Small Bass(A,D,G,c),大提琴与中提琴间插入 Tenorviolin(G,d,a,e^1),再在小提琴以上加上 Soprano Violon(c^1,g^1,d^2, a^2)和 Treble Violin(g^1,d^2,a^2,e^3)。现列出如下:

倍高音小提琴	Treble Violin	g^1 d^2 a^2 e^3
高音小提琴	Soprano Violin	c^1 g^1 d^2 a^2
小提琴	Mezzo Violin (violin)	g d^1 a^1 e^2
中提琴	Alto Violin (viola)	c g d^1 a^1
次中音提琴	Tenor Violin	G d a e^1
大提琴	Baritone Violin (cello)	C G d a
次倍大提琴	Small Bass Violin	A1 D G c
倍大提琴	Contrabass Violin (Bass)	E1 A1 D G

7)下面列出小提琴上用不同弦芯(羊肠、钢丝、尼龙)材料制成的三种法国皮拉斯托(Pirastro)弦的张力,以使大家对琴弦张力的大小有个大体了解。弦的有效长度是328mm,各音的频率为 $f_{e^2}=659.20$Hz,$f_{a^1}=440.00$Hz,$f_{d^1}=293.66$Hz,$f_g=196.00$Hz。*。

	羊肠弦(Eudoka)		钢丝弦(Piranito)		尼龙弦(Synoke)	
	直径(mm)	张力(Kg)	直径(mm)	张力(Kg)	直径(mm)	张力(Kg)
e^2	0.295	6.95	0.258	7.65	0.262	7.90
a′	0.676	4.94	0.488	5.90	0.690	5.69
d′	0.825	3.55	0.675	5.49	0.760	4.65
g	0.925	4.09	0.759	5.65	0.810	4.67

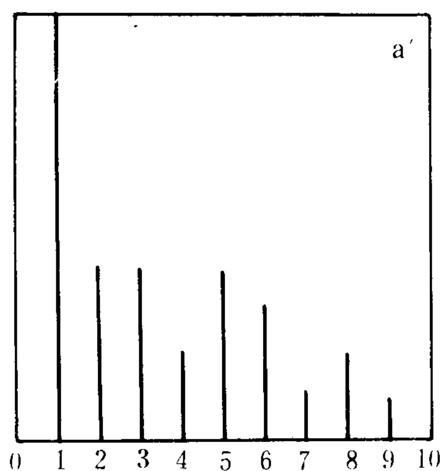


图 7-30 中提琴的频谱

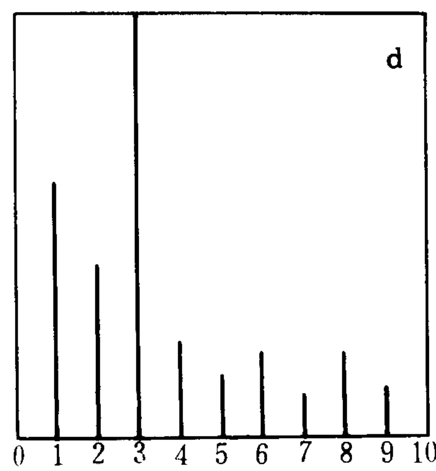


图 7-31 倍大提琴的频谱

可见小提琴四根弦(括号内是牌号)合计的张力约为20多Kg。

7.3.8 吉他

1)相传吉他(Guitar)是源于3000年前埃及的古乐器,于1200年传入西班牙,当时的吉他

* 根据中央音乐学院郑荃制作的提琴所提供的实测数据

是四对双弦(c,f,a,d^1)各两根,十六世纪时是五对双弦(c,f,a,d^1,g^1),也有过三弦一组的吉他或很多弦的吉他。十六世纪时的吉他很小,长只有76.5cm,现在的吉它长98cm。十八世纪成为六根弦(E,A,d,g,b,e^1),亦叫六弦琴,十九世纪由托雷斯(Torres)定型。以后传入各国,成为遍及全世界的一种弹奏及伴奏乐器。有些地方的吉他不一定是六弦,如有一种塔吉克吉他是七弦的等等。吉他的外形如图7-32所示。

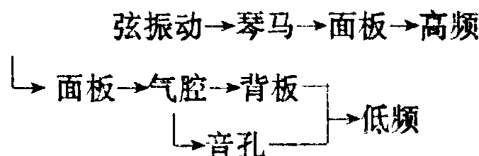
许多著名音乐家都有吉他作品,例如,贝多芬,帕格尼尼(Paganini,1782-1840)等。柏辽兹是靠演奏吉他作曲的。

吉他用高音谱表记谱,实际音高为低一个八度。

1946年以后,发展了尼龙弦。现在的吉他,钢丝或尼龙弦已取代了肠弦,有明亮的音色。

原先,吉他的演奏方法是右手从琴下托住琴身,小指按在面板上,用一、二、三指拨奏,左手用棍子横上作临时品位。后来发展为固定品位。

2)吉他的音箱是一个亥姆霍兹振子。弦振动的传递途径是:



3)吉他的声谱如图7-33所示。

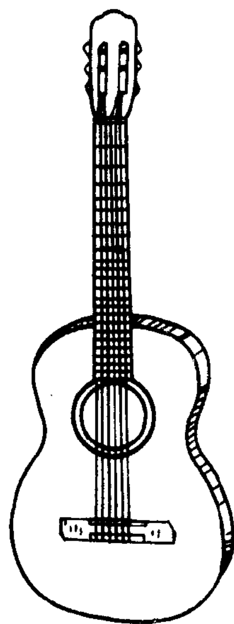


图7-32 吉他

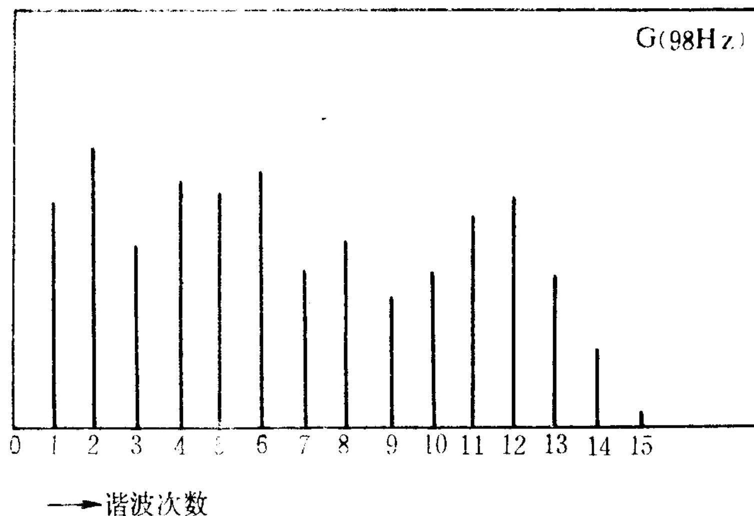


图7-33 吉他的频谱

4)除了通常的调弦方法以外,吉他还可以有独特的调弦方法,如格兰茵厄(Grainger)把吉他各弦调成c、g、c^1、e^1、g^1、c^2,即c大调的1 5 1 3 5 1,或F大调的5 2 5 7 2 5,或G大调的4 1 4 6 1 4,加上人工品位,可以很容易奏出各调的Ⅰ、Ⅳ、Ⅴ级和弦。

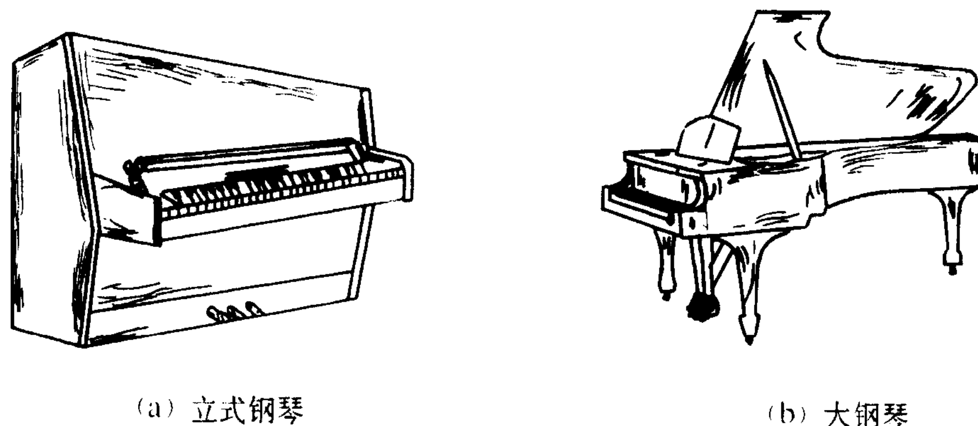
5)有调性的吉他作品及演奏有古典派和浪漫派,无调性的可以有爵士,序列音乐,1/4、1/6、1/7、1/16的微分音音乐等。吉他有各种演奏技法,可以用指面、指甲、贝壳、象牙、金属片板

拨奏，有近琴码奏法、近指板奏法等。夏威夷吉他则平放，用金属棒按弦滑动演奏。

7.3.9 钢琴

1)很古的时候(公元前B·C·3000-1000年)已有弦乐器。公元前500-300年，毕达哥拉斯发明的莫诺柯特(Mono-chord)是一根弦的，弦下有码，移动码可改变音高，据认为这就是钢琴的始祖。十三世纪的克拉维柯(Clavichord)是键盘乐器的先驱，它是一种击弦古钢琴，当手指按琴键时，琴键内端的木杆上升，木杆上端的铜块击弦而发声。有时一弦多音，如九弦三十五键等。早期，克拉维柯只有两个八度，单弦；后来发展到双弦或三弦，弹奏时只用中间几个手指，琴键的颜色黑白与当今是相反的。巴赫、莫扎特对它特别偏爱。十五至十八世纪克拉维柯由三、四个八度发展到五个八度。哈普斯科(Harpsichord)也称大键琴，是一种拨弦古钢琴，流行于十六至十八世纪。当手指按上琴键时，琴键内的木杆上跳，木杆顶端的用羽管或皮革制成的拨子拨弦而发音。不同材料的拨子产生不同音色。哈普斯科的音板很薄，不用金属，琴弦细，因此发音轻柔，音量小则，是提琴的好的伴奏乐器。贝多芬有的作品注明为哈普斯科而作。哈普斯科在法国叫克拉维桑(Clavecin)，在德国叫克拉维庆巴罗(Clavicenbaro)，是巴罗克时期的重要乐器。在独弦琴(即莫诺柯特)、萨泰里琴(Psaltery，即在三角形木箱上张几条琴弦，挂在脖子上用手指甲或羽管拨奏的中古时代的琴)、德西马琴(Dulcimer，一种三角形的敲击乐器，手持木槌或竹槌敲击发声，后传入我国是为洋琴)、克拉维柯和哈粒斯科的基础上，经过演变和改进，1709年意大利人克里斯多佛里(Cristofori，1655-1731)发明了世界上第一台现代钢琴(Piano-forte或Piano)。

2)现代的标准钢琴有七个半八度，88键(1855年)，从A^0(27.5Hz)至C^5(4186Hz)，比古钢琴扩大了音域，增加了音量，改用琴槌击弦。钢琴称为Piano-forte，即强弱可变化的意思，其音量可随演奏而改变。现代常见的钢琴有两种，一种是大钢琴(Grand Piano)，亦称平台钢琴或三角钢琴；一种是立式钢琴(Upright Piano)，见图7-34所示。



(a) 立式钢琴　　(b) 大钢琴

图7-34 (a)立式钢琴(b)大钢琴

3)在钢琴音乐的发展中，有许多著名的作曲家。十八世纪初是古钢琴家，其代表及作品有斯卡拉蒂(Scarlatti，1685-1757，"小猫赋格曲")、亨德尔(Handel，1685-1759，"愉快的铁匠")，和巴赫(Bach，1685-1750，"十二平均律钢琴曲")。十八世纪后期是维也纳古典学派，有海顿、(Haydn，1732-1809，"匈牙利风格回旋曲")、莫扎特(Mozart，1756-1791，"土耳其进行曲")，和贝多芬(Beethoven，1730-1827)，"第三、第五钢琴协奏曲"，"月光"、"热情"、"暴风雨"、"告

别"、"悲怆"、"黎明"奏鸣曲)等。贝多芬又是浪漫派的开路人。十九世纪是浪漫派,还有韦伯、(Weber,1786-1826,"邀午")、舒伯特(Schubert,1797-1826,"鳟鱼钢琴五重奏")、舒曼(Schumann,1816-1856,"快乐的农夫")、门德尔松(Mendelssohn,1809-1947,"春之歌")、肖邦(Chopin,1810-1849,"练习曲 24 首,前奏曲 26 首")、芭达捷芙斯卡(Badarcveszka,1838-1862,"少女的祈祷")、德沃夏克(Dvorak,1841-1901,"幽默曲")、勃拉姆斯(Brahms,1833-1897"匈牙利舞曲")、柴可夫斯基(Tchaikovsky,1840-1893,"第一钢琴协奏曲"),莫索尔斯基、(Mussorgsky,1839-1881,"图画展览会")、德彪西(Debussy,1852-1918,"月光")、拉赫玛尼诺夫(Rach maninoff,1873-1943,"第三钢琴协奏曲")、肖斯塔科维奇(Shostakovitch,1906-1975,"第一钢琴协奏曲")等。许多著名的音乐家都有钢琴作品。

各个时期还出现了许多著名的钢琴演奏家,如李斯特(Liszt,1811-1886)、圣桑(Saint-Saëns,1835-1921)、鲁宾斯坦(Rubinstein,1829-1894)、克拉拉(Clara,1819-1896)、斯克里亚宾(Scriabin,1872-1915)等。

近代,爵士钢琴、摇滚钢琴等也是流行的流派。七十年代,钢琴与电子音乐结合产生了理查德·克莱德曼(Richart Clanderman,1953-)的钢琴流派等。

4)实际上钢琴的频率公式都是经验公式,举例为:

$$f=nf_0\sqrt{1+k\frac{n^2d^2}{TL^2}}\qquad (n=1,2,3\cdots)\qquad (7.4)$$

或

$$f=nf_0\sqrt{1+(\frac{n}{l})^2\frac{\pi d^2E}{32\sigma}}\qquad (n=1,2,3)\qquad (7.5)$$

公式(7.4)、(7.5)中 f_0 是基频,由公式(7.1)得到,L 是弦长,d 是弦的直径,T 是张力,k 是刚性系数,E 是杨氏弹性模量,$\sigma=\frac{T}{s}$是单位面积上的张力,n 是谐波次数。公式表示出高次音之间距离不断拉大,即有分音存在。

5)钢琴的弦列分布,以普通的星海立式 115 钢琴为例,最低的 15 个音即 1-15 号键是缠弦单根,16 至 30 号键是双弦,也是缠弦。从 31 键以上是三根单丝弦。弦列的计算基本上是根据公式(7.1),即:

$$f=\frac{1}{2L}\sqrt{\frac{T}{\rho_l}}\qquad (7.1)$$

在大体上一定的张力要求下,同时改变弦的粗细和长度。当然,弦的粗细不可能每一根都改变,例如每一组音用一种粗细的钢丝,最高的一组∅′=0.875mm,然后每降低一组弦径增为 16/15 倍或 8/7 倍,再改变弦长。弦长的改变可以是等差的,也可以是等比的。最后用改变张力调整音高。

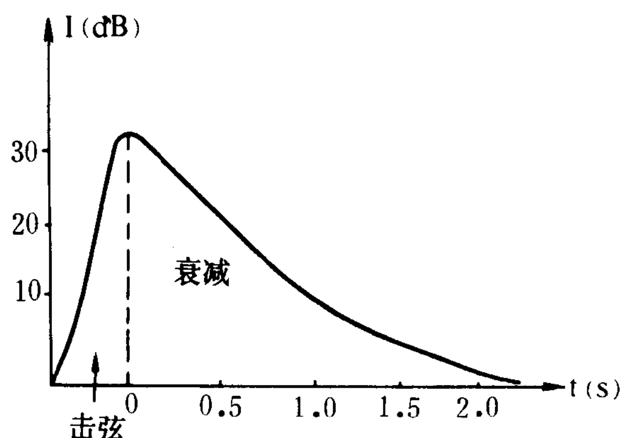


图 7-35 钢琴击弦后声强的变化

6)钢琴击键后的声音强度变化如图 7-35 所示:很快上升,缓慢下降。

7)钢琴的发音完全不是一个单音,其频谱是混合谱。图 7-36 和图 7-37 所示,是钢琴的波形和频谱。特别要注意的是它的波形并不对称,而且有一由弱到强、再由强到弱然后又增强的过程。对于不同键,钢琴的频谱有很大差别。

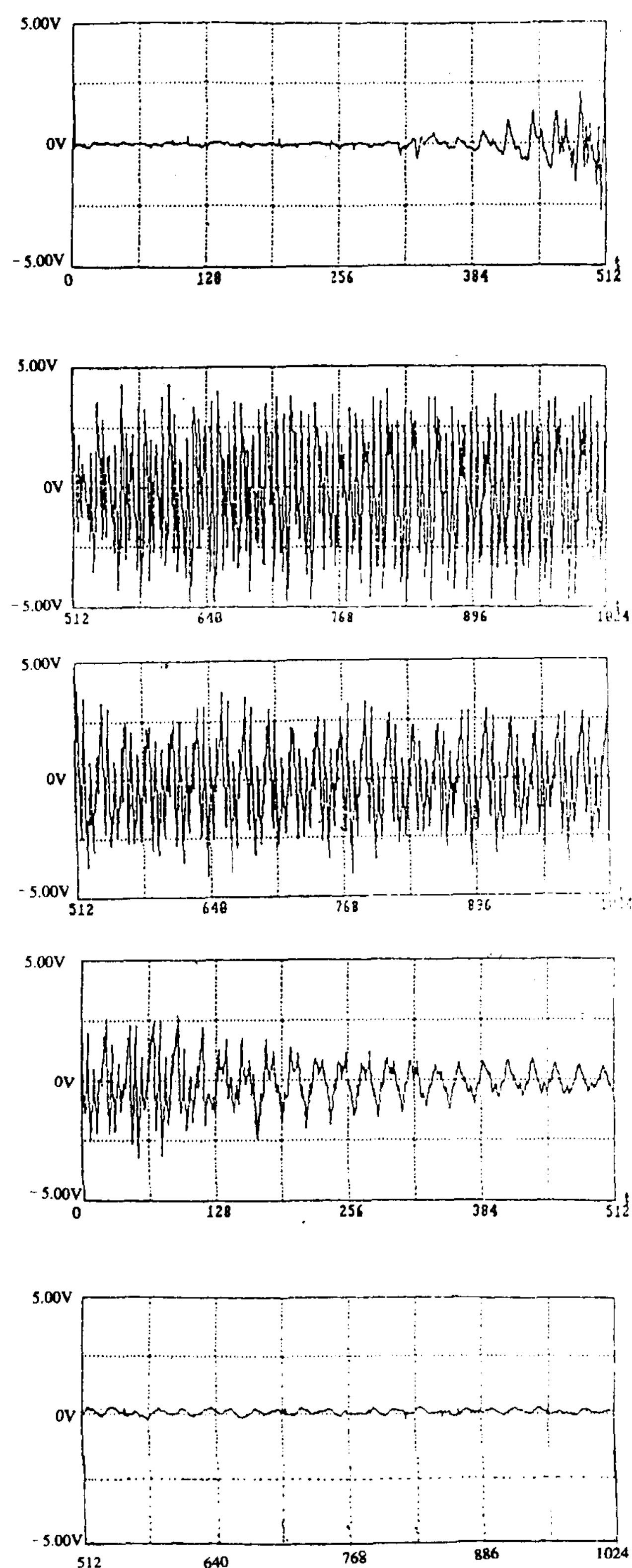


图 7-36 钢琴声的波形

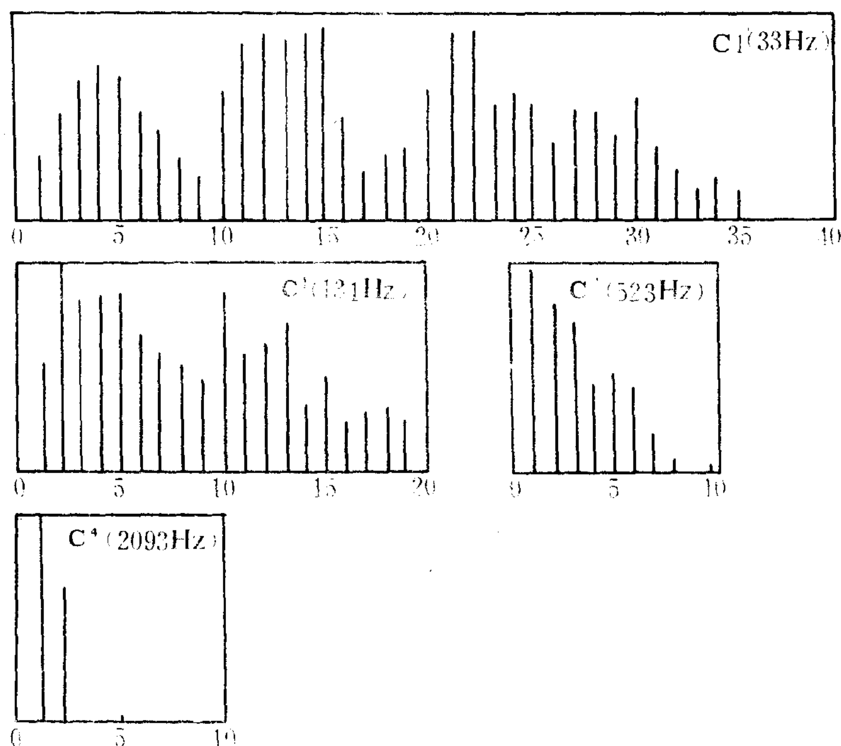


图 7-37　钢琴的频谱

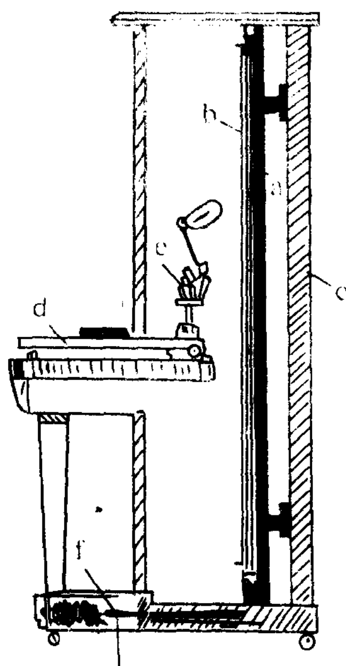


图 7-38　钢琴的结构

8）钢琴的结构，基本上是四个部分，即铁弦架 a 和钢丝（琴弦）b，音板 c 及其前后的空间，键盘 d 和击弦机 e，以及踏板 f。以立式钢琴为例，如图 7-38 所示。

钢琴的发声过程是这样的：用手按下某个键盘(Key)，通过击弦机(Action)，弦槌敲击琴弦，使琴弦发生振动。琴弦的振动有发生基频的整体振动和发生谐波的分段振动。在敲击琴弦时，还可以产生纯五度等与基频有简单整数比的振动。琴弦的振动通过琴板肋木上的琴码和铁弦架传到琴板，使琴板两侧的空气产生疏密波，把声音传播出去。由此也可见，要用录音机录取钢琴的共鸣声要在琴板后面取样，而要录取较强的颗粒声甚至击弦的杂音，则可从琴弦旁侧取样。

前面，在讨论弦乐器的材料、结构、工艺与音质的关系时，我们已经举过一些钢琴的例子，下面，我们再结合钢琴的特点，与演奏联系起来，讲一下钢琴的音质问题。

9）钢琴的键盘和击弦机是一系列多级的复合杠杆，其示意图如图 7-39 所示。由于采用了多级结构，加上弱音踏板，演奏者可以有效而明显的控制音量，从 5dB 直到 20～80dB；而且可以大大增加琴键反应的灵敏度，使同音键的复奏达到每秒 8 次以上，优质的琴可达 12 次。

钢琴槌头是靠冲击击弦的，也就是说，当你非常缓慢地按下琴键时，槌头达不到琴弦，距弦有一段距离；正常按键时，击弦槌靠惯性击弦，并很快即返回。击弦槌位置如果与弦很近或击弦力弱，则击弦时槌与弦接触的时间就长，接触面积就大，这样，高次谐音就会消失；相反，”击弦槌位置如果较远或击弦力强，则击弦时槌与弦接触时间就短，面积就小，高次谐音就会较多地保留。因此，一般钢琴低音区击弦槌位置较靠近弦，音色就浑厚、柔和，而高音区击弦槌位置较远，音色就易丰满。有数据表明，低音键击键时间约为 3ms，而高音键是 0.3ms。

图 7-39 钢琴的击弦机构

钢琴按键和离键过程是这样的：按下琴键，槌头冲击琴弦，发出冲击音，这时制音器同时离开琴弦；琴键保持按下，弦自由振动，发出正常音；手指离开琴键，制音器返回，制音毛毡与弦接触，发生“毛刺”音。于是，钢琴的按键时的力度，即加速度，速度，按键时间，离键速度等都会影响音质。如演奏力度大，即冲击音强。弹长音时正常音及谐波丰富，而短音则冲击声加制音的“毛刺”声较多。离键速度快则声音突然被遏止，而慢慢离键则有朦胧感等。

10）钢琴踏板的使用问题。这一点许多人往往不注意。有人把钢琴的踏板称为“钢琴的灵魂”，是很有道理的。

钢琴上的踏板原来是从曲杆演变出来的，现代的钢琴一般有三个踏板(Pedal)。右踏板叫制音踏板(Dample Pedal)，也通常被人称为“强音踏板”，实际上踏下它对音量的增大作用有限(一般增加到 1.5 倍左右)，主要是形成共鸣声。本来，如果不踩下这个踏板，手指离键时，制音器(Damper)也就把琴弦捂住了；而踩下这个制音踏板后，制音器不再立即把琴弦捂上，于是相当于手指没有离键(图 7.39)，所以也叫延音踏板。这时，长时间的琴弦振动会激起各级弦的共鸣。共鸣声是“纯正”的音(与基频成小整数比)，与十二平均律钢琴和弦键及其谐波声在一起交响，构成了钢琴特有的音色，即包含谐波、分音和拍频，例如 C 的三倍频与 G 交响。如果再加上几个键同时发声，就会有极丰富的音响效果。

踏板的动作可以是按键前踩下，这时从冲击声开始就有充分的共鸣；可以是按键以后踩

下，这时共鸣就弱而“单纯”，主要是一根弦上的；可以是按键同时踩下，或似踩非踩等，如果把踩踏板与按键方式合在一起，就会产生千变万化的效果。

左边的踏板是弱音踏板(Soft Pedal)。旧式的结构是使击弦槌错位，原先击三根弦变为击两根弦，从而使音量减低；现代钢琴通用的是：踩下踏板时，击弦槌(Harmmer)位置距弦线近些，以使冲击力小些，如图7.41所示。还有的琴有中间踏板，踩下时使在弦槌与琴弦之间夹上一层叫做琴舌(Tongue)的薄呢子，也起弱音作用。三种踏板交互使用，又可使演奏的音色变化更为丰富。

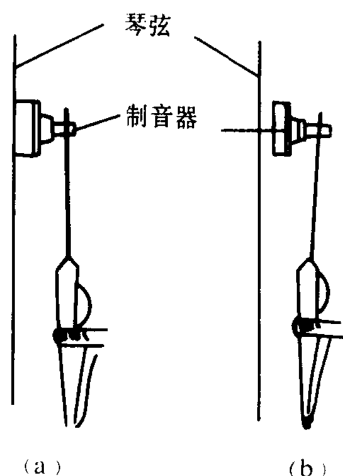


图7-40　(a)未踩踏瓣，制音器捂住琴弦
(b)踩下踏瓣，制音器离开琴弦

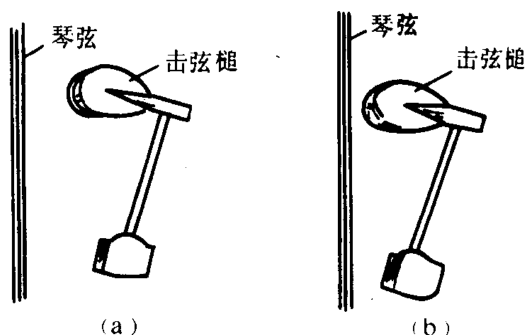


图7-41　(a)未踩踏瓣，击鼓槌距管弦远
(b)踩下踏瓣，击弦槌距琴弦近

11)钢琴的调律是以十二平均律为基础，用标准音叉，人耳听，利用拍的现象来实现的。也可以用调律仪器，即指示每个音的频率与标准的是否相同或差多少，然后再加以调整，但最终是以人的听感为准的。

12)钢琴的挑选，在一定质量水平的牌号中，主要是挑选好你所喜爱的音色和灵敏的键盘反应，特别要注意的是不同音区(高、低音)和单弦、双弦、三弦的连接部音色是否一致。除了极优质的名牌厂家外，同一牌号的钢琴质量有很大差别。

13)钢琴的保养主要是防虫、防干(潮)。

14)对于钢琴的进一步发展，有人提出设法用较轻的或无内应力的新材料取代铸铁架，以减轻重量；用塑料或其他代用材料代替琴板及击弦机，简化击弦机构，以减轻重量，降低成本；也有人提出从根本上改变击弦机构，而代之以磁力传动等。但这些多还是脑袋里的东西，还有待实践的检验。

7.3.10　胡琴

1)胡琴的前身是我国唐代北方少数民族奚族人的奚琴。奚琴有两根弦，用竹片在两弦之间擦弦发音。因古代把北方少数民族都统称为胡人，所谓“胡服骑射”，所以他们的琴叫胡琴。至宋代称为嵇琴，因是嵇康所制得名。现在的二胡、京胡、板胡、高胡、马头琴等都是由胡琴发展而来的。

2)二胡，是我国民间流行的一种拉弦乐器，音色柔和优美，委婉细腻，著名的曲子有《江河

水》、《二泉映月》、《空山鸟语》等。二胡的弦线从肠弦、丝弦改为钢丝弦后，改善了音质和音量；改用了"双千斤"，扩大了音域，有的音域达到三个八度($a-a^3$)。二胡一般用五度定弦。它的频谱如图 7-42 所示。

3)京胡是京剧的主要伴奏乐器，在清乾隆间随京剧的形成而出现。京胡的琴筒用竹制，蒙蛇皮，竹琴杆，用硬弓演奏。京胡的声音尖、厉、脆，用五度定弦，音域有两个半八度($g-e^3$)。京胡的声谱如图 7-43。

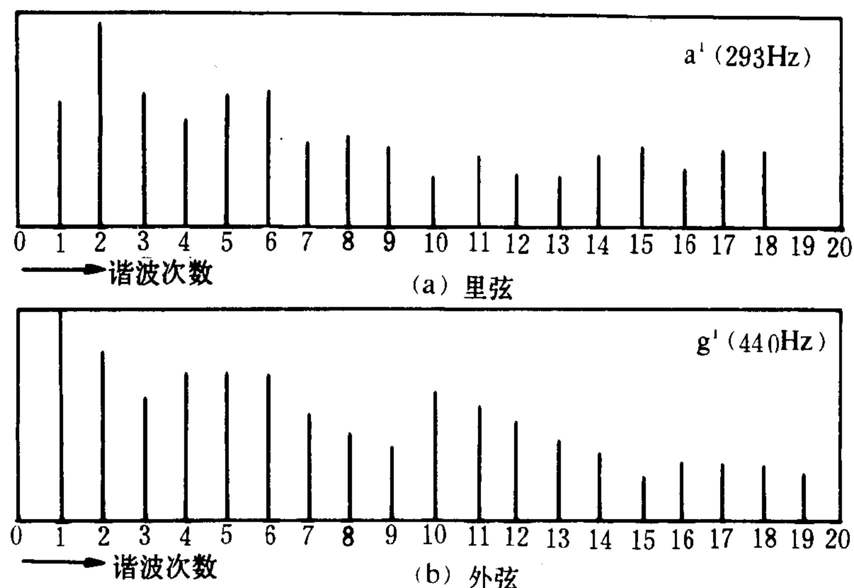


图 7-42 二胡的频谱(a)里弦(b)外弦

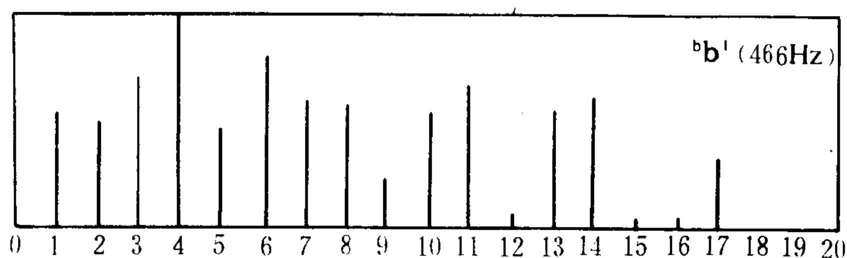


图 7-43 京胡的频谱

§7.4 管乐器

7.4.1 管乐器发声的激励机制

要使管乐器发声，先要有一个激励器，激励器是激励空气使之振动的结构。然后是气柱在管腔内形成柱波，发出一定音高的声音。

管乐器的激励器有以下几种：

1)边棱(Edge)(图 7-44)系统或称气簧激励(Air Reed)，如长笛、短笛、中国的笛、箫，管风

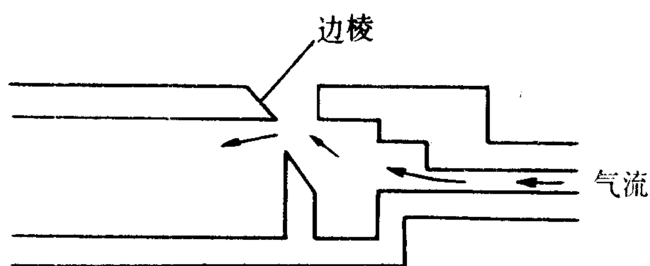


图 7-44　边棱（气簧）激励

琴的风管（Flue Pipe），从边棱上或管的斜切面上吹气，形成气流，发出咝咝声，或气流在底角附近振荡形成哨声，这里包含了各种频率的振动。

2）簧片（Reed）激励系统，如单簧管、双簧管、巴松、巴乌。单簧是簧片拍打器壁，双簧是两片簧相互撞击，发生振荡，其中包含了各种频率。簧片虽有固有频率，但其振动很弱。

3）唇簧（Lip Reed）激励系统，如铜管乐器。两片嘴唇振荡作为一个振动源。

7.4.2　管的定律

粗略地讲，管乐器的音高决定于管长。对于闭管（Closed Pipe），即一端封闭一端开启的管子，如图 7-45(a)驻波的波节（图中 N）形成于闭端等处，图中波腹 A 形成于开端等处。有：

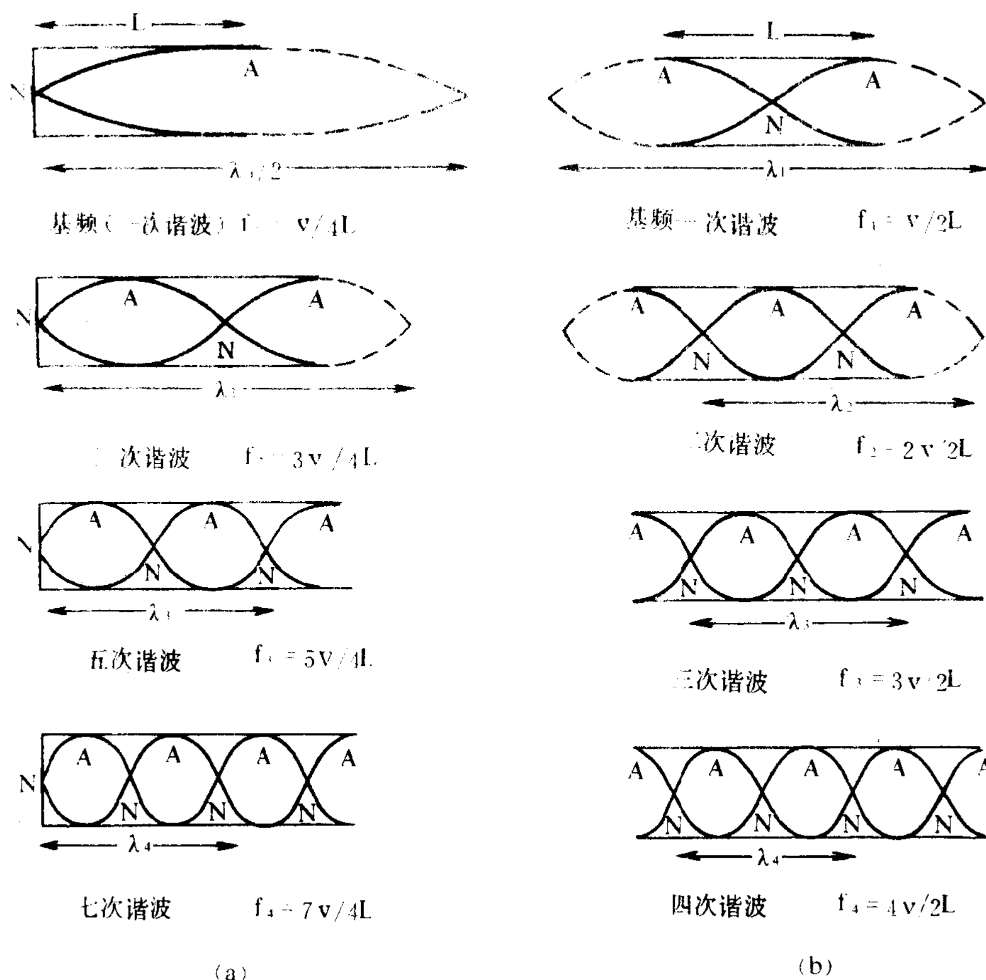


图 7-45　(a)闭管中空气驻波　(b)开管中空气驻波

$$f=n\frac{v}{4L},(n=1,3,5\cdots\cdots) \quad (7.6)$$

对于开管(Open Pipe)，即两端是敞开的管子，如图7.45(b)有：

$$f=n\frac{v}{2L},(n=1,2,3\cdots) \quad (7.7)$$

公式(7.6)、(7.7)中f是管发声的频率，L是管乐，v是声速，波节和波腹的位置见图。

笛子开侧孔，铜管乐器用活塞阀或旋转阀(图7.46)都是改变管长。长号即拉管，是直接控制管长以改变发声频率。图7-45中(a)是附管型铜管乐器的活塞阀(Piston Valve)。左边是没有按下活塞时的气路，右边是按下活塞后气路变了，即管长长了，发声频率低了。(b)是附管型铜管乐器的旋转阀(Rotary Valve)，左边是旋纽位于原位时气路，右边是将旋纽旋转90°后的气路，这时气路变了，即管长长了，发声频率低了。

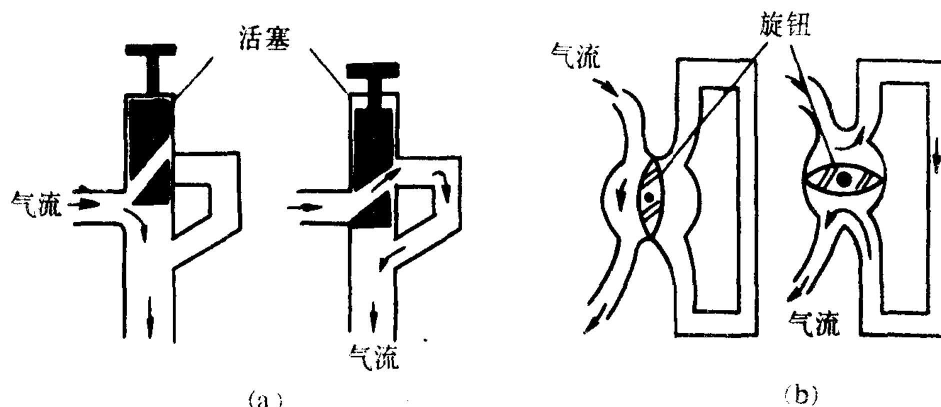


图7-46 (a)活塞阀(b)旋转阀

一般铜管乐器有三个活塞；每按下中间一个活塞音高降低半音，按下靠近的一个降一个全音，按下第三个降低一个小三度，即二者之和，也可以同时按下两个，组成大三度、四度等。也有的另有一个四度活塞。

7.4.3 管长校正(Lenth Correction)

过去及现时一般通称"管口校正"(Mouth Correction)，实际上是管长的校正。因为驻波要在管口以外才形成波腹，所以有效管长Le大于实际管长L。因此，要对L作一个校正，即加上一个修正值。

修正值的大小，与管端是开管还是闭管，管是圆的、椭圆的还是方的，管径的大小，管径的变化，管尾即最后一个侧孔以下部分的长短，吹口的形状和大小，侧孔的大小，管的壁的厚薄等都有关。已有的报导都是经验的和半经验的，如：

$L_e=L+1.5d$ （直径为d的柱形管）

$L_e=L+3a$ （边长为a的方管）

中国晋朝荀勖的修正公式是：

$L_e=L+\frac{5}{3}d$ （直径为d的圆形律管），

$L_e=L+2d-d_0$ （d是管径，d_0是吹口直径） (7.8)

对铜管，管长修正还与喇叭口形状有关。例如：

$$L_e=L+\frac{D_0+D_1}{2}+l \qquad (7.9)$$

公式(7.9)中 l 是吹口伸出乐器管口的长度，D_0 是喇叭口外径，D_1 是距喇叭口 $1/2D_0$ 处的管的直径。

再列出一个中国横笛的管长修正公式。

笛子是开管，有

$$f=n\frac{v}{2L_e} \qquad (7.10)$$

$$L_e=L+(b+2.0r)\frac{R^2}{r^2}+0.6R \qquad (7.11)$$

或

$$L_e=L+(b+a_1r)\frac{R^2}{r^2}+\frac{(b+a_2r)\frac{R^2}{r^2}}{1+\frac{(b+a_2r)\frac{R^2}{r^2}}{L+0.6R}} \qquad (7.12)$$

公式(7-10)-(7-12)中，b 是音孔处的管壁厚度，r 是音孔的平均半径，R 是笛管的半径，$a_1\approx2.0$，是一个与吹口和唇部影响有关的因子，因此这一项是与吹气端有关的修正项。$a_2\approx1.7$，是与出气端有关的修正因子，与计算哪一个孔后面情况有关。这个式子不过是说明笛子发声的高低与这些因素都有关，各种影响都可归结为管长的修正。

7.4.4 激励器与管的耦合

不论是用哪一种激励器，都会得到与管长相应的频率与之耦合发声。边棱激励兼有各种频率。簧片本身的固有频率很高而且这个频率振动的能量很小，因此不会影响乐器发声的频率。铜管则是改变口形就可以找到合适的频率。所以在吹笛、吹号时都要改换吹法，寻找合适的部位和感觉，有一种没有按键或伸缩管长的小号即军号(Bugle)也可以吹出不同的音调来，就是这个道理。

我们听到的管乐器的发声不是管内驻波的声音，而是管口外空气激励的效果。

7.4.5 管乐器的材料与音质

1)木管乐器的木材要精选。需要用优质硬木做成。有用塑料代替木质制造的单簧管，但音质不好。

2)制作中国管乐器的竹子的成熟程度，生长年限，含水率高低，粗细，圆度，长短，粗细变化率，作为边棱材料的硬、软、厚、薄等，都会影响音质。管内驻波振幅的大小与材料的密度、弹性模量及厚度都有关。用作乐器的竹子还要求表面光洁、无开裂、无虫眼、无疤痕、无朽渍。因此竹子要经选择。例如用毛竹、淡竹(金花竹)、苦竹制笛，紫竹制箫、笙、笛等。

3)用银制铜管乐器，音色柔和明亮，但价高；有#65、#62 铜(黄铜)，则抗蚀能力及活塞灵敏度差，音色欠佳；用铜则音色发毛。目前正在发展价廉物美的材料。有一种铜铝合金，耐磨，抗蚀，外表光泽好，宜作用铜管乐器。

7.4.6 管乐器的结构与音质

管的发声机制的不同以及管长、形状、粗细、厚薄、笛尾、侧孔、吹孔等，都会影响音高和音

质。对于音高的影响在前面已经讨论过了。

1)管子太短,低频截止过早,即低频下不去;管子太细,则基频及低次谐波弱,声音也不好,这些与共振峰有关。

下面列出一个长笛的截止频率公式:

$$f=0.11\frac{b}{a}\frac{v}{\sqrt{s(t+1.5b)}} \tag{7.13}$$

公式中v是波速,b是吹孔半径,a是管径,t是管壁厚度,2s是两个侧孔的中心距,0.11是与孔形有关的系数。上式说明影响的因素是很多的。

2)喇叭口对管乐器的音量和音质影响很大。接上喇叭口,共振峰可以靠扰、压缩。当然太近了,共振峰叠合,也不好。改变喇叭口的尺寸,可以使共振峰集中在一段频率范围内,如小号集中在1000Hz附近,法国号在520Hz附近。开口太小,低音出不来。不接喇叭口,直接辐射,能量只有百分之几被辐射;接上喇叭口,被辐射的能量可提高到10%～50%。

喇叭口一般有锥形(军号,中、低音号)、指数形和悬链形(拉管、圆号、短号)三种。悬链式的喇叭口比指数式喇叭口第一共振峰强度高出六倍。

3)笛尾是指笛子的出音孔到端面的长度,理论上说,这不影响管长,但对音质有影响。笛尾长则低音厚,太长了就不好吹了,太短则低音差。

4)笛子有没有笛膜及笛膜与吹孔的距离也影响音色和音量。有笛膜则音脆而亮,笛膜距吹孔近则高音亮,距吹孔远则低音亮。

5)铜管乐器可以加弱音器。弱音器材的形状有锥形的、杯形的等等,在喇叭口伸进一个拳头也是一种弱音器。不同形状的弱音器有不同的音色。

6)波姆体系(Boehm System)是一种键结构。西洋管乐器从没有键、到几个孔都是一键一孔的单键,十九世纪初发展到十三键的单簧管。到十九世纪中,复键的长笛,即带有环键和盖键的长笛问世,手可以不动位置而控制所有的键,大大提高了演奏速度,丰富了表现力。后来发展成完整的波姆体系。

7.4.7 管乐器的制造工艺与音质

1)制做管乐器时,必须对材料进行烘烤或加湿,以保持一定湿度。

2)材料的切割方向与收缩率有关,顺切收缩率要比横切大一倍左右。

3)大众化的管乐器用塑料单体制作,要进行处理,以接近木材的性质。

4)笛子等的内壁要加工,使之平滑;中国笛的竹节要打磨掉,以保持音色圆润。

5)簧片要处理,削薄,削尖,才好起振。

6)中国笛的笛膜的贴法、松紧也对音质有影响。高音笛不贴膜有如西洋的短笛声,低音大笛贴上膜有如西洋的黑管声。

7.4.8 管乐器的演奏与音质

1)管乐器演奏时口形及吹气角度、方向、距离等都与音质有关。双簧管口含簧片深,则音色亮、尖,含簧片浅,则音色暗、柔。吹笛子时吹气角度找得不对就吹不响。铜管靠口形改变音高,实际上到吹响时已经调整好唇口的形状了。

2)吹气的强弱、运气都是重要的。吹气的强弱除可以超吹(高八度)外,还会影响音高。图

7-47 表示长笛频谱的包络与吹气强度(ff-pp)的关系。图 7-48 是长号的包络线随频率变化，亦与吹气强弱有关。可以看出，共振峰随吹气强度增大而向高频方向移动，这也就反映出音色的不同了。

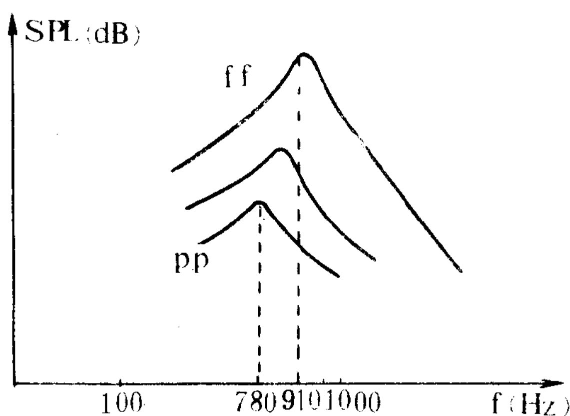


图 7-47 长笛共振峰随吹气强弱的变化

3)指法也很重要，颤音、滑音、微分音等都可以从指法中解决，中国竹笛的叠音(极快的上倚音)、垛音(极强的叠打音)、气指滑音(指法与气息结合)、指震音(手指在音孔旁震动)，指变强弱音，打音(用指的同音反复)等都是指上功夫。

4)不论是吹奏铜管不还是竹笛，不同的吹法会产生千差万别的音色和听感，这一点在开始建立音高的这个瞬态中更为明显。这是因为，一开始吹奏时吹奏者要把一定的振动脉冲基频"输入"管内，可以说这些输入的脉冲是随机的，不知道管子的基频是多少。然后，这些已储存的脉冲与后来再输入的波形之间就必然会产生干扰，就会引起非常复杂的变化和瞬态状况，引起听感和音色的不同。

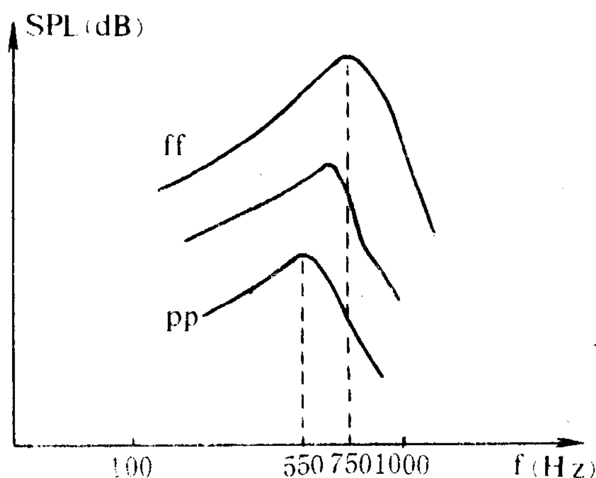


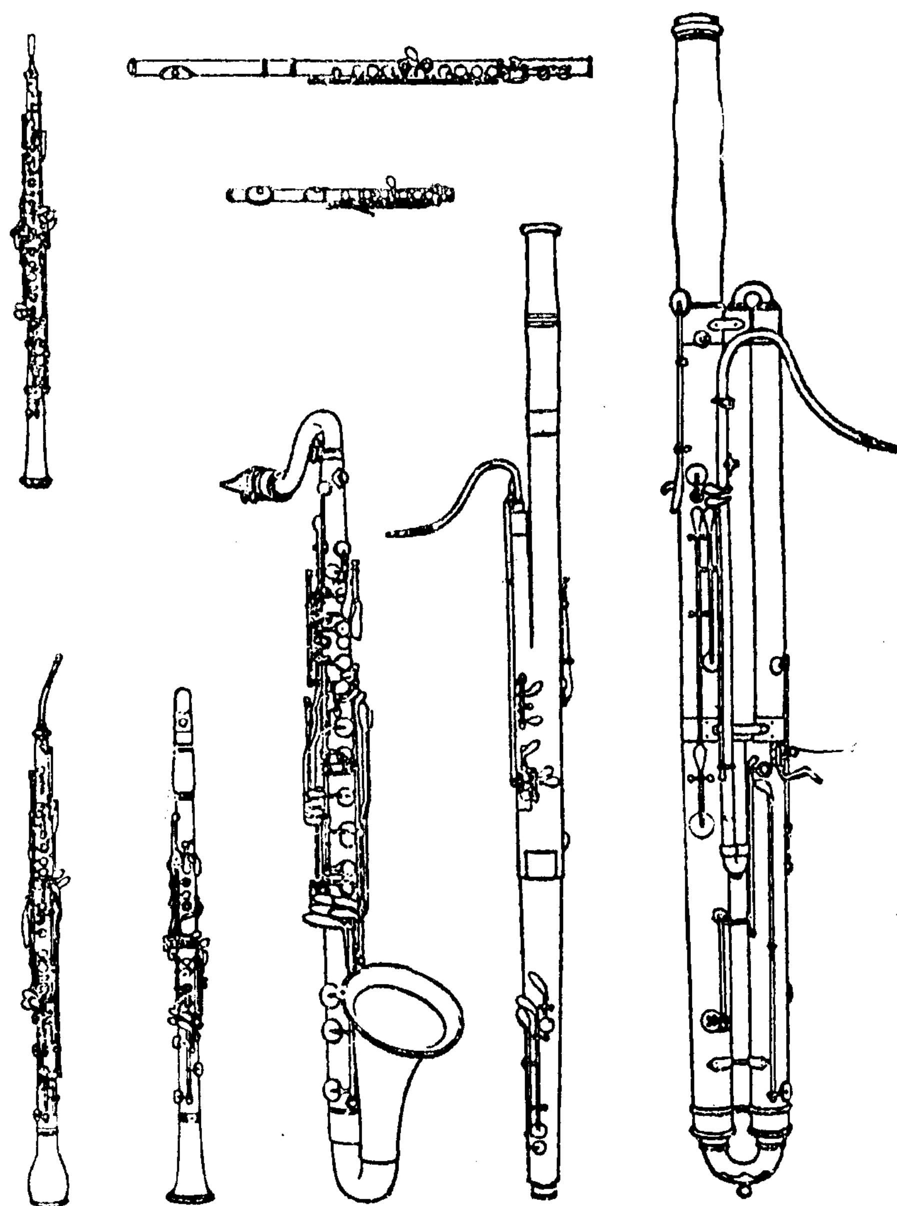
图 7-48 长号共振峰随吹气强弱的变化

5)中国的竹笛能吹出强烈、激越的音调，也能吹出细如游丝的旋律；可以吹出快速的断音，也可以吹出柔曼的连音。还可以有许许多多的技法如：气震音是使气流震动而使音波动，气变音是改变气流及口风使音降低，气冲音是用丹田冲击发出断音，循环换气法是同时吐气及吸气使音连续不断，泛音吹法，以及用舌尖轻点产生清楚而不断音的轻吐，用舌尖重点产生重音的单吐、双吐、三吐以及舌尖打嘟噜的花舌等，都是嘴上的功夫。

6）还有一些的特别的技法或"先锋派"的演奏。如把喇叭口去掉，在铜管内加水，不用号嘴，按下二分之一活塞等。

7.4.9 木管乐器(Wood-Wind)

1)西洋乐器中常把短笛(Picolo)、长笛(Flute)、双簧管(Ohoe)、单簧管(Klarinet)、萨克管(Saxophone)、和大管(Bassoon)称作木管乐器。如图 7-49 所示。英国管(Egnlish Horn)也是一种双簧管，大管是双簧的。



①长笛②短笛③双簧管④单簧管⑤萨克管⑥大管⑦低音大管⑧英国管

图 7-49 木管乐器

2)这些乐器的音域大体是：短笛 D_5-A_7，长笛 G_3-C_7，双簧管 E_3-A_6，单簧管 C_4-C_7，萨克管 G_3-$^{b}G_6$，大管 $^{b}B_1$-$^{b}E_5$。*)

3)这些乐器的频谱如图 7-50 所示。(a)是短笛，尖锐，(b)是长笛，清纯，(c)是双簧管，甜美，(d)是英国管，丰满，高音丰富，(e)是单簧管，只有奇次谐波，(f)是萨克管，二次、四次谐波强，g 是大管，三倍频强。

---

*)一种音名记法。钢琴从低到高为 A_1、$^{b}A_1$、B_1、C_2……C_8。

7.4.10 铜管乐器(Brass Wind)

1)西洋乐器中的铜管乐器一般包括小号(Trampet),短号(Carnet),法国号(French Horn)(又称圆号),长号(Trombone)(又称拉管、伸缩号)和大号(Tuba),也叫土巴号,如图 7-50 所示。

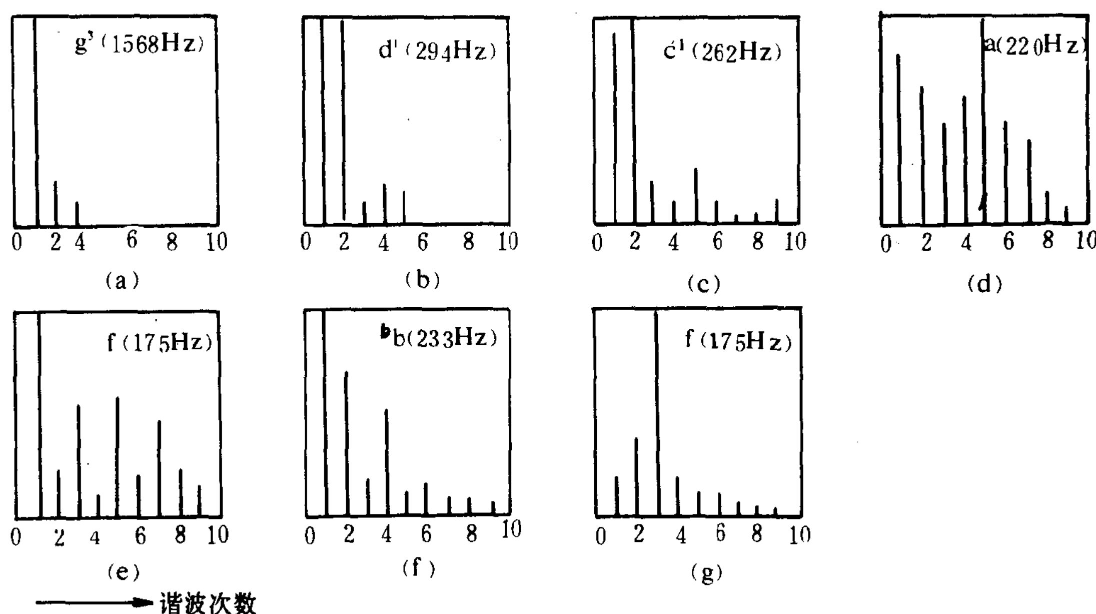


图 7-50 木管乐器的频谱

2)这些乐器的音域大致为:小号 E_3-$^bB_5$,短号 E_3-$^bB_5$,法国号 B_1-F_5,长号 A_2-$^bG_4$,大号 E_1-$^bB_4$。

3)这些乐器的频谱如图 7-52 所示。(a)是小号,(b)是短号,(c)是法国号,(d)是长号,(e)是低音号。

7.9.11 中国笛(Di)

1)中国笛渊源已久。1987 年在河南出土的中国最早的骨笛远在 8000 年以前。可以认为,在兽骨上开一个孔吹出声来是最古老的乐器。自古以来,笛是最常用的一种管乐器,而且音高标准也常常用笛子做出。如晋荀勖的笛律,朱载堉的律管等。古时横吹、竖吹的都叫笛。

2)现在的横笛常见的有两种,一种是曲笛,用于昆腔,形体较长;一种是梆笛,用于梆子腔,形体较短,如图 7-53 所示。

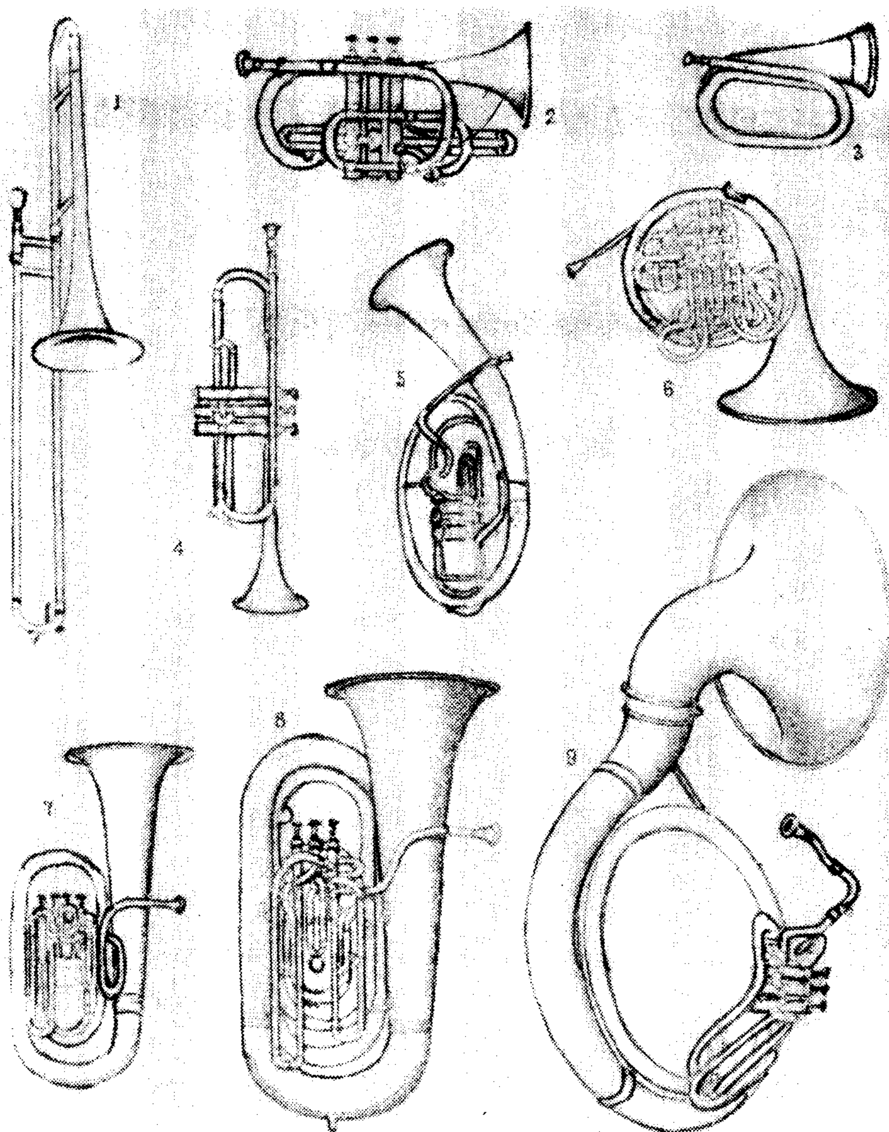


图 7-51 铜管乐器：①长号；②短号；③步号；④小号；⑤瓦格纳大号；⑥圆号；⑦降 B 调尤风宁号；⑧降 B 调低音大号；⑨苏萨大号

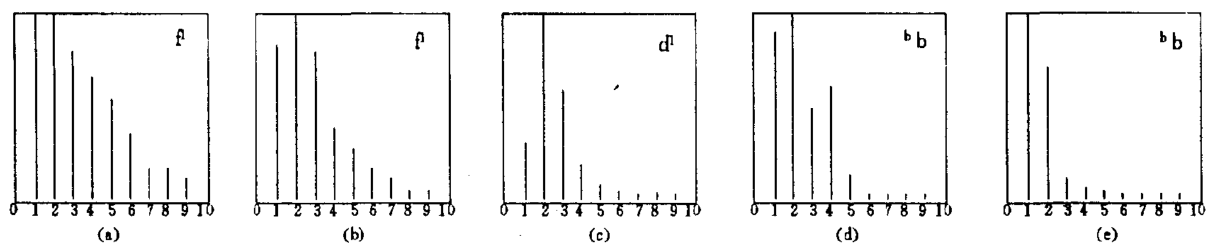


图 7-52 铜管乐器的频谱

3)中国笛的音域有两个八度，例如曲笛 a^1-b^3，或 $^{b}B^1$-c^4，梆笛 d^2-e^4 或 $^{b}e^1$-f^4。



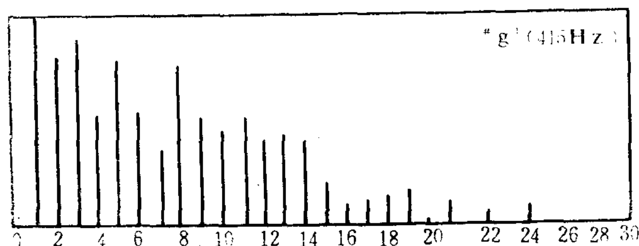
(a)



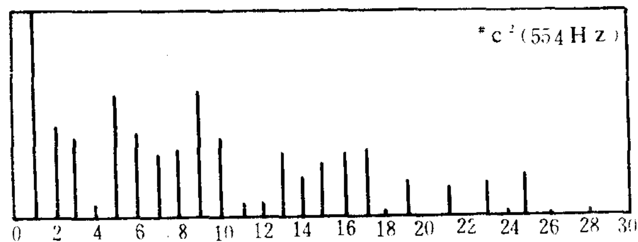
(b)

图 7-53 (a)曲笛(b)梆笛

4)中国笛的频谱如图 7-54 所示。



(a)



(b)

图 7-54 笛的频谱(a)曲笛(b)梆笛

§7.5 簧振乐器(Reed Instrument)

7.5.1 簧振乐器的发声

簧振乐器是靠簧片振动直接激励空气，以簧片振动的频率发声。风琴、手风琴、口琴、八音琴等都是以一端固定的自由簧振动的簧振乐器。

一端固定的自由簧振动频率：

$$f=\frac{0.56kv}{L^2} \tag{7.14}$$

其中 v 是声速，L 是簧片长度。k 是一个与簧片形状有关的常量。

对于圆棒，k＝a/4，a 是直径。

对于空心管，$k=\frac{1}{4}\sqrt{a_1^2+a_2^2}$，$a_1$、$a_2$是内、外直径。

对于矩形簧，k＝0.296b，b 是沿振动方向的厚度。

7.5.2 手风琴

1)手风琴是一种音色丰富、音量大、携带方便的和声乐器，用一、二台琴就可以有一个十乐队的效果，并有基独特的音色风格，因此，是一种有前途的乐器。

常见的手风琴有钮扣式手风琴(巴扬，Баян)和键盘式手风琴，(Acordion)。钮扣式手风琴流行于苏联及欧洲部分地区及许多亚洲地区。在我国主要是键盘式手风琴如图 7-55 所示。

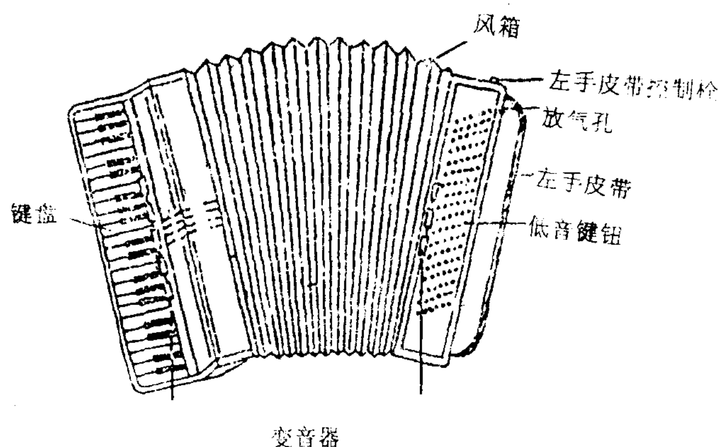


图 7-55 键盘式手风琴

一般的键盘式琴有多种型号，如右手分别有 25、30、34、37、41 键的，1-4 排簧，音域分别为 $g\text{-}g^2$、$g\text{-}c^2$、$g\text{-}c^3$、$g\text{-}g^3$，$f\text{-}a^3$；左手分别有 7、12、16、17、24、47、60、80、96、120 个低音钮(Bass)的，1—3 排簧。实际上的音域比这要宽，所谓改变变音器是选用不同音高组的簧，即一排簧的没有变音器；两排簧是每个键有高低差八度的两个音，两个变音器；三排簧是中音簧两个，低音簧一个；四排簧是一个低音、一个高音、两个中音簧。

钮扣式手风琴的右手是单簧，具有俄罗斯民间风味。

还有一些特殊设计的手风琴，如更多的低音键，用汉族五声音阶和声等。

2)手风琴的左手贝司(Bass)钮是按五度关系排列的，自上至下，如果以 C 为准，则向上是 G、D、A、E、B、$^{\#}$F…，向下是 F、^{b}B、^{b}E、^{b}A、^{b}D、^{b}G……。对于 120 Bass 的标准手风琴，每一排从外向内是对位低音(每个低音上行大三度音)、基本低音、大三和弦、小三和弦、大三小七和弦(下属音的属七和弦，，即基本音的大三小七和弦)、减七和弦。如图 7-56 所示。

对于基本低音和对位低音，每钮只发一个音(可包括八度)，对于其它四种和弦钮，每钮发三个音。由于手风琴低音钮每组音高只有十二个音，例如从 C 至 B。对于 C 调的大三和弦，是发 C、B、G 三个音，而对于 G 调的大三和弦，则是发 D、E、B 三个音，对于^{b}B 调，是 D、F、^{b}B 三个音。亦即是说，对于手风琴左手和弦钮，什么调的大三和弦发出的是原位、还是第一转位、还是第二转位音是固定的，不能改变，因此，手风琴左手和弦钮不讨论转位问题，如有需要，用简单低音钮来弥补。而对于七和弦钮，则少五音，只有根音、三音和七音。当然，也不能任意转位。

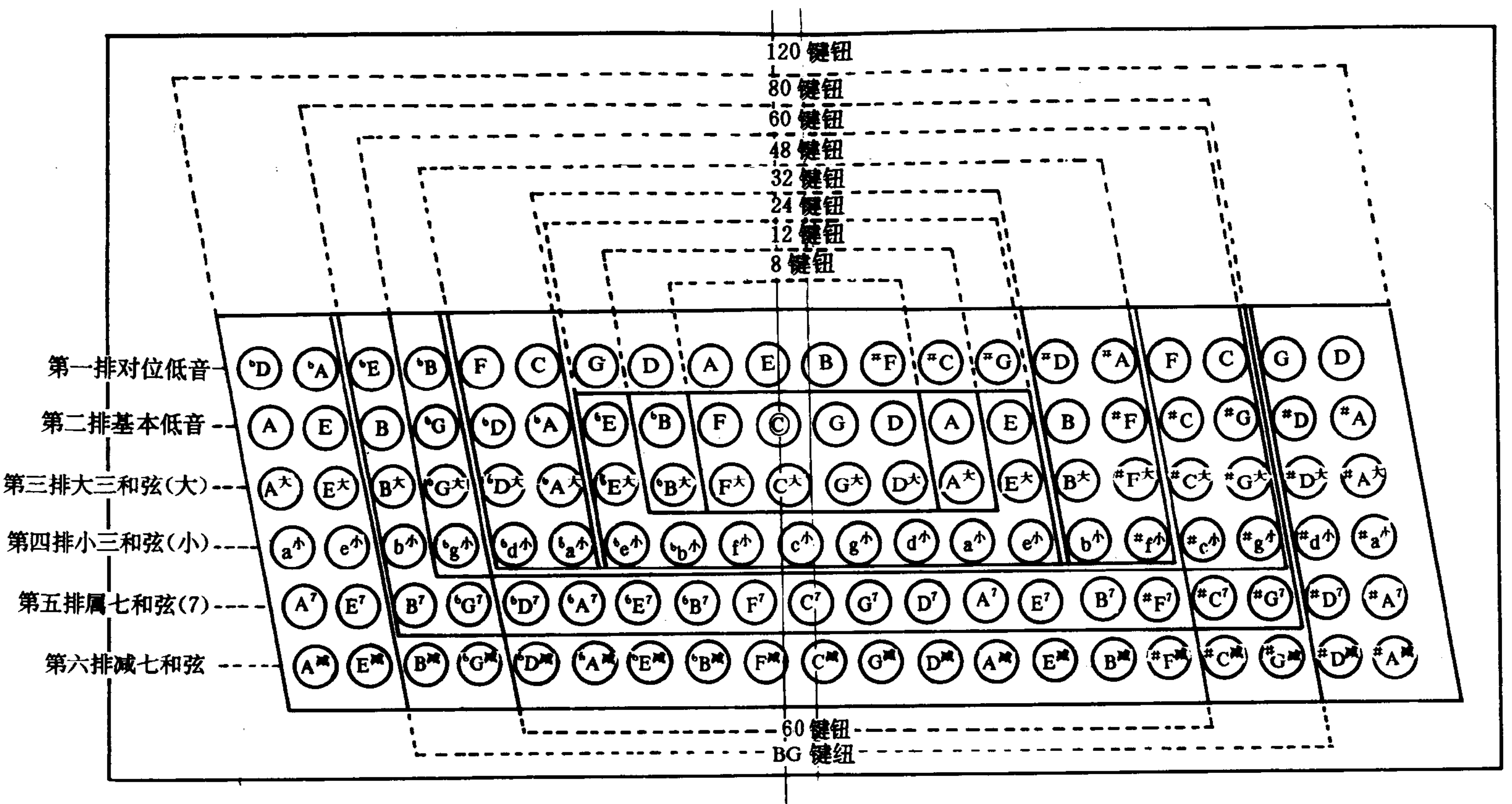


图7-56　手风琴低音键分布

3)手风琴的变音器是选择一组或几组不同音高组的簧。例如,右手两排簧的两个变音器,按下其中一个是只用一排簧发声,另一个是两排簧都发声。三排簧的排列是一中(即中音簧一个,下同),二中,一低,一中一低和二中一低(即全放)。有时三排簧有七个变音器,这是把两侧的两个重复,以便于在演奏过程中就近操作。四排簧是11-13个变音器,也是排列组合的结果,即一高,一中,一低,二中,一高一中,一高一低,一中一低,一高二中,一低二中,高、中、低和一高二中一低(全放),共十一种。十三个变音器也是两边的两个重复。由于手风琴的音色不同,只不过是几组簧片的不同排列组合,所以所谓被模仿的音色都是不太相像的。

左手的变音器一般也控制两个或三个不同八度音高的音高组。

4)手风琴演奏的特点是靠风箱鼓气,所以不能分别奏出左、右手的不同的力度,也不能区别右手或左手各键钮的不同力度。也正因为是用风箱,所以在风箱上就可以作许多文章,例如来回短促拉、合风箱的震音,左手抖动风箱的抖颤音,右手摇曳风箱的摇颤音,右手靠手腕和手形抖动琴键的弱颤音等。

手风琴也是一种和声乐器,如果左右手都用全放音,按下左、右的琴键,右手五个键,左手两个钮包括一个和弦钮,在一台标准手风琴上(右手四排簧,左手三组簧),就可以同时有三十多个簧片发声。手风琴也是一种旋律乐器,左、右手可以演奏不同的旋律,而且还可以单用右手演奏双旋律或带有保持音的分解和弦。

5)新发展的手风琴有右手45键、右手185 Bass的西德琴,左手有三排高、中、低音钮。美国的右手45键,左手120 Bass的手风琴有六排旋律低音,通过变换机构也可以转换为传统的Bass结构。还有有管道共鸣器的高档琴,左手按中国五声调式结构安排的琴等。

7.5.3 八音琴(Musical Box)

八音琴的基本构造如图7-57所示。一块有一定厚度的薄铜片a,锯出一系列长短不一的条块b,靠在一个用发条(或马达)带动的、有尖突c的滚筒d上。上紧发条以后,当发条松开时,滚筒转动,尖突拨动钢条而发声。薄钢片的长短不同,可以发出不同频率的声音。安排好尖突的相对位置和前后距离,就可以奏出动听的音乐来。八音琴还有一个惯性飞轮,是用作稳速的。

八音琴可以小到藏在手表里或带在身上,大到像一台机器,发出洪亮的声音。

7.5.4 笙(Sheng)

中国的笙是一种簧管乐器,一簧一管,配合发音,早在殷代的甲骨文中就已有记载。春秋战国时期曾是一种主要的乐器。大的名"竽"(Yu),有三十六簧;小的名笙,有十三、十七、十九簧等不同型号,如图7-58所示。

笙的结构是,铜制的簧片插在竹管的下端,再把这些竹管插进一个匏或木或铜制的带有吹口的嘴上。吹奏时用手按着竹管的下部所开的孔,即可使簧片振动并与竹管耦合而发音,由于以簧片振动发音为主,所以乐器分类中归入簧振类乐器。笙可以同时奏出双音或更多的音,是中国特有的同时发双音以上的"管"乐器。

现在已对笙做了不断的改进,已有二十一、二十四、二十五、二十六簧加共鸣器的笙及键盘排笙等。

十七簧笙的音域为$^{\#}c^2$-g^3,二十一簧笙的音域为g^1-b^3。

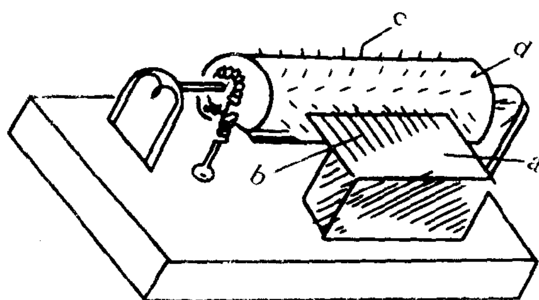


图 7-57　八音琴的基本结构

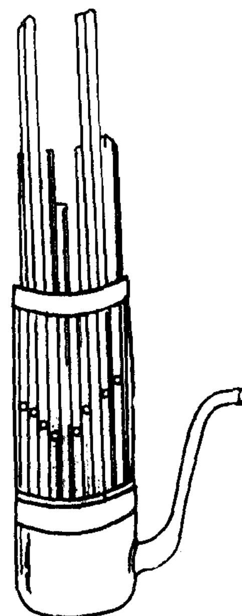


图 7-58　笙

7.5.5　管风琴(Organ,Pipe Organ)

1)管风琴的渊源已久,记载中最早的管风琴是公元前 250 年古希腊工程师克斯西比奥斯(Ktasibios)制造的水压式管风琴(Hydraulos)。公元 720 年,记载有气动式管风琴(Pneumatic Organ)。管风琴主要用于宗教音乐。公元十世纪,英国温切斯特教堂的管风琴已有 400 个音管、26 个风箱,演奏起来响彻全城。十四世纪法国哈尔梅特教堂的管风琴已经有一排脚键,由十个人操纵风箱,音管长达九米多。文艺复兴时期又流行几种小型管风琴。15 世纪出现簧管,即自由簧管风琴,有传说是根据中国的笙而改进的。十八世纪是管风琴极盛时期。由于管弦乐的出现,管风琴一度衰落,十九世纪又有所复兴。到目前为止,管风琴仍然是一种不可缺少的独立的传统乐器,而且更加"现代化"了,动力用电机取代了人力,操作系统由电脑控制,取代了机械。

我国在十八世纪末,随着基督教的传入,管风琴也曾在上海、北京、青岛、天津等地的一些教堂里使用。"文革"时期被摧毁殆尽。1990 年,北京音乐厅又安装了一台管风琴。

当前世界上最大的管风琴是美国新泽西州(New Jersy State)大西洋城(Atlantic City)的管风琴,完成于 1930 年,共有两套各 7 个和 5 个键盘,有 1477 个音栓,十九个音色区,33112 支音管。音管最短的只有 0.5cm 长,最长的达 20m。要用 365 马力的马达鼓风,音量相当于 25 个铜管乐队,最高音为 g^6(12544Hz),最低音为 C3(8.2Hz)。

2)管风琴大体上由音管 a、音栓 b、键盘 c、风箱 d、动力 e 和传动 f 等几部分构成。如图 7-59 所示。

管风琴有两类音管，一种是风管(Flue Pipe)，一种是簧管(Reed Pipe)，分别属于管乐器和簧振乐器中的簧管乐器。风管如图 7-60 所示，有开管，有闭管；管体 a 为圆形，管脚 b 为圆锥形。管体与管脚连接处有窄长的开口即管嘴 c，有上簧唇 d，下簧唇 e，内有管舌 f。空气从管脚下端的进气口 g 进入，冲击管唇、管舌，发生振动，由管长决定音高；管长可以调节，是一种边棱激励型的管乐器。管的大小、粗细等决定风量，从而决定了音量。而管嘴和管唇的形状、宽度、管脚的大小、共鸣情况等各种因素又决定了它的音色。

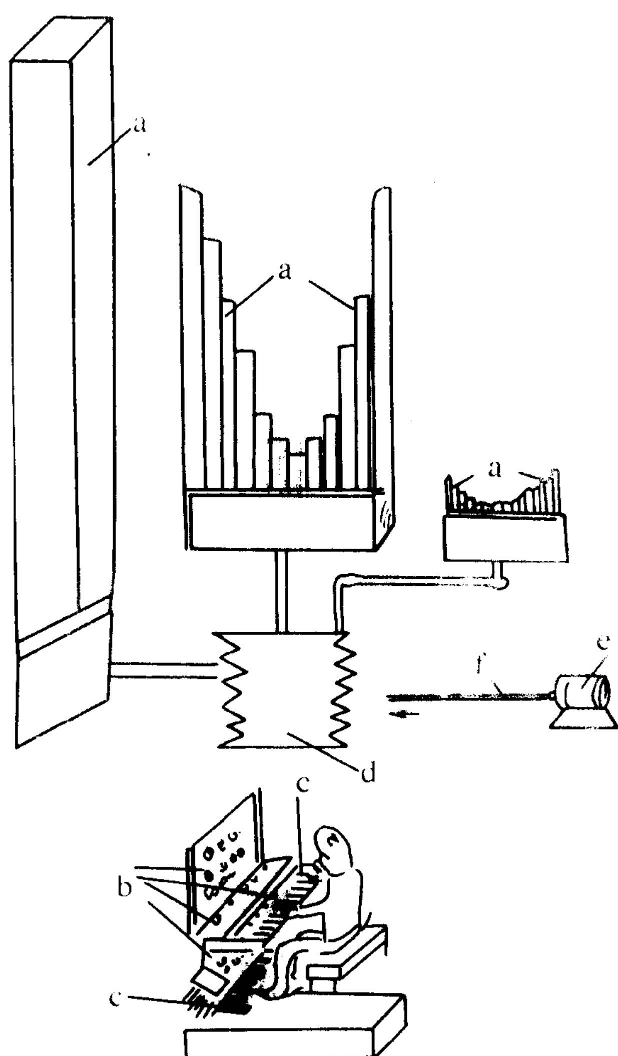


图 7-59 管风琴结构

簧管如图 7-61 所示，a 是共鸣管，b 是调音杆，用以调整簧座 c 上簧片 d 的长度。簧片的形状和长度以及材料性质决定音高，而音管 e 则起稳定音高作用。f 是管脚，g 是进气口。

音栓(Chest)是一排排圆形钮扣状物，有伸缩音栓(Slide Chest)和扭动音栓(Pallet Chest)。调节音栓，可以改变进风位置、风量、发声区域等等，借以改变音色，或似笛音，或似弦乐音，或有颤音，或有泛音等等。过去是用机械动作的，现在都用电脑控制。

管风琴的多种键盘有主键盘、增音键盘、伴奏键盘、回声键盘以及脚踏键盘等。

原始的管风琴风箱是“皮老虎”鼓风袋，通过贮气箱使风力均匀，现在用电力鼓风。管风琴原始的传动机构都是杠杆传动，现兼用电脑控制。

3)北京音乐厅的管风琴。共有两套演奏台，一套是可移动的，一套是固定的。每套有手键盘三组加一组脚键盘，有 78 个音栓，其中音色控制音栓有 60 个，功能控制音栓 18 个。4859 个音管，其中风管 4166 根，簧管 693 根，最长的音管长 5.6m。风管有木管 354 根，金属簧管 3812 根。整个琴的宽、高、厚度是 $19.2\times11\times3\text{m}^3$，重 6 吨。动力用 4 马力的鼓风机，鼓风机总风压为 1670Pa，工作风压为 750～850Pa。

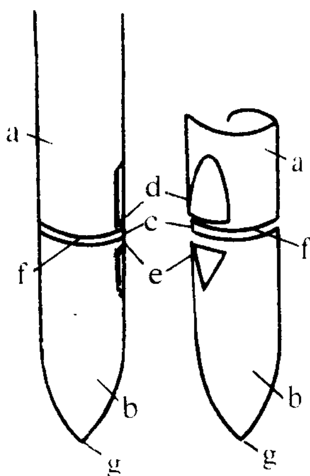


图 7-60　管风琴的风管

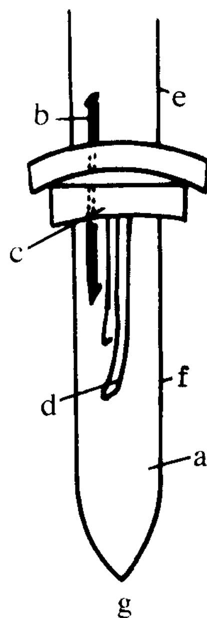


图 7-61　管风琴的簧管

§7.6　膜板乐器

7.6.1　膜板乐器的振动膜式

1)膜振动时会有各种形状的节线,从而有不同的振动模式,有不同的频率,如图 7-62 是周边固定理想膜的振动模式。f_0 是基频。

2)圆膜的振动频率:

$$f=0.44\sqrt{\frac{T}{D^3t\rho}} \tag{7.15}$$

公式(7.15)中,T 是张力,D 是圆膜的直径,t 是膜的厚度,ρ 是密度。

对于圆板,周边固定时有:

$$f=\frac{0.12tv}{D^2} \tag{7.16}$$

周边自由时有:

$$f=\frac{1.65tv}{D^2} \tag{7.17}$$

公式(7.16)、(7.17)中,D 是圆板的直径,t 是厚度,v 是波速。

对于钟,有:

$$f=\frac{ktv}{D^2} \tag{7.18}$$

公式中 D 是钟的直径，t 是钟壁厚度，k 是一个常量，v 是声速。

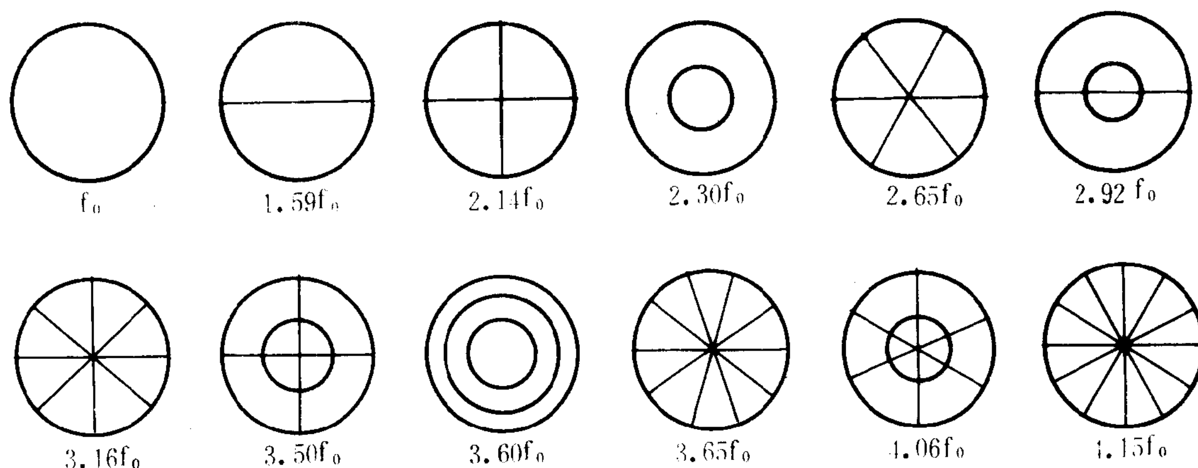


图 7-62　膜的理想振动模式

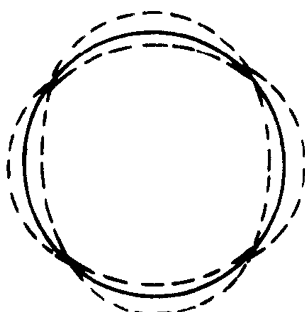


图 7-63　钟的振动模式

3）钟的振动也有一定模式（图 7-63）。可以有六个、十个、十二个“角”等。

4）两端均自由的矩形板，其振动频率为：

$$f=\frac{0.389kv}{L^2}h^2 \tag{7.19}$$

中心固定的均匀板，振动频率为：

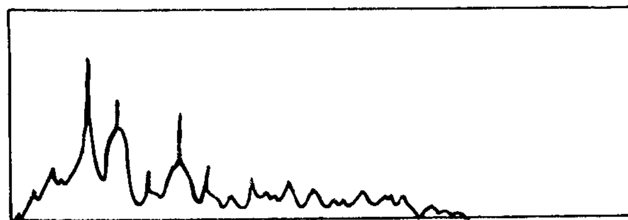
$$f=\frac{3.56k'v}{L^2} \tag{7.20}$$

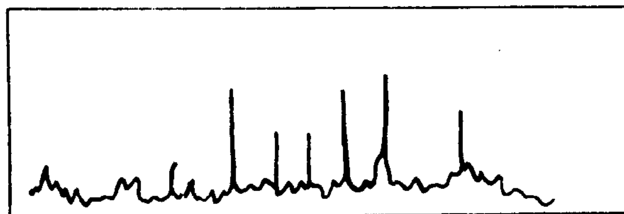
公式中 L 是板长，h 是板宽，v 是声速，k 及 k^1 决定于板的形状。

膜板乐器击锤的材料、形状以及敲击部位、力度等都与音质有关。

7.6.2　几种膜板乐器的频谱

下面列出几种膜板乐器频谱，如图 7-64。频谱随时间变化很大。


(a)


(b)

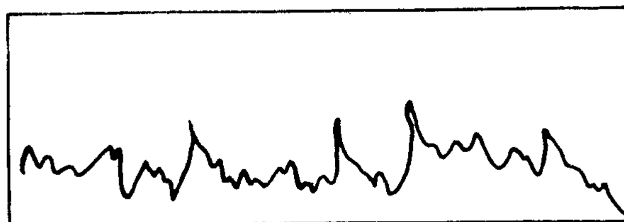

(c)

图 7-64 膜板乐器的频谱(a)定音鼓(b)三角铃(c)铜钹

§7.7 温度、湿度对乐器的影响

7.7.1 温度的影响

由于环境(包括气候、灯光、舞台、剧场等)温度变化,以及人的吹奏或持握,乐器的温度会发生变化。

1)弦乐器的频率只与弦长 L、线密度 ρ_l 张力 T 等有关(式 7.1)。这些量随温度变化很小,最大的有～10^{-5}/℃,所以温度变化对弦乐器影响不大。

2)管乐器的发声频率与声速成正比。而声速随温度变化很大,由于

$$v=331.6+0.6t$$

温度每变化 1℃,v 的变化、亦即频率的变化为

$$\frac{0.6}{331.6}\approx 0.18\%$$

如果温度变化为 10℃,a^1=440.00Hz 就将变为 447.9Hz 或 432.2Hz,相差约 30 音分。这

是一个很大的音高变化。

因此，管乐器的生产规程中要标明温度条件，如：

乐器	音名	频率(Hz)	长度(cm)		
			15℃	25℃	35℃
长笛	c^2	523.00	26.50	27.07	27.64
中国曲笛	d^2	587.00	23.39	23.90	24.41
中国梆笛	f^2	698.00	20.43	20.86	21.29

解决的办法是：

把管做成能伸缩的两截。

随温定音：如春秋季节定 $a^1=440Hz$，则冬季定 $a^1=435Hz$，夏季是 $a^1=445Hz$。

还可能改换哨子，加调温装置等。

3)对于膜板打击乐器，温度的影响更多在于影响张力、硬度等。

7.7.2 湿度的影响

湿度一般不是立时对乐器起作用的。据报导有一台钢琴放在一间屋内，不弹奏，在 9 个月内(6 月至下年 3 月)，相对湿度在 30%-60%范围内变化。几个音的音高变化，以音分计为：

c_{52}: +9～-1　　c_{40}: +11～-4

c_{28}: +7～-1.5　　$^{\#}c_{29}$: +12～-6.5

影响还是可见的。音名 C 下右角的数是钢琴键号。

§7.8 中国民族乐器的改革

7.8.1 中国民族乐器的特点

在前面有关乐器的各方面的叙述中，我们已经讲述了不少有关中国民族、民间传统乐器的内容，现在，再来就我国乐器的特点及改革谈一些看法。

我国民族乐器有悠久的历史，有过许多种类、样式，有些有其独特的音色和效果：如埙的特殊的材料、形状和音色；笙的能出双音，是一种无与伦比的特种的管乐器；琵琶在弹拨乐中特别丰富的技法和表现力；马头琴如歌唱般的音色；唢呐、板胡的激扬；还有二胡、笛、洞箫、编钟等，在世界乐器之林中都占有一席之地。我国许多少数民族、许多地方曲种还有许多特殊的乐器。

但是我国的民族乐器也存在许多弱点，主要有：

1)音域窄：如二胡是民乐队中的主要弦乐器，音域只有二个八多些，笛子也只有两个半八度。可以说少有音域较宽的民族乐器。虽然编钟能够有数个八度，但不易实用。

2)变音少：单一个管乐器可以演奏的调少。

3)音量小：特别是许多弦乐器都如此。

4)低音乐器少：传统的民族弦、管乐器中没有低音乐器。

5)音准差：像竹笛、箫等材料靠自然生成，原材料规格不统一，加工少量的几支可以做到音很准，但对于大批量的产品，音准就不易把握了。

6)没有铜管乐器。

7)音色好的较少：一般比较单薄、尖锐，欠圆润、丰满。

8)个性太强：板胡、唢呐，笛子不般不易合奏。

9)一般乐器演奏较费力。

以上这些，都影响民族乐器的表现力、感染力。

7.8.2 中国民族乐器的改革

几十年来，特别是解放以后，对民族乐器改革已做了许多工作。针对上述弱点有所前进，如改善民族乐器的音质，发展一些新乐器如改良笙，改良洋琴，低音大胡，改良巴乌，加键笛，转调扬琴，扩音笙等，取得了一定成果，有的已被肯定，有的还在试验中。中国的武汉大锣已被世界各大交响乐团所采用，许多民乐器也已流传世界各地。

改革的方向应是：

1)肯定中国民族乐器的特有的风格及表现力，它也是世界乐坛上的一支，绝对不能持完全否定的态度。

2)保持民族乐器的音色特点和演奏效果，不是都朝西洋乐器看齐，把特点丢失了。

3)不必求全，乐队中可以借用西洋乐器，如大提琴、倍大提琴等。

对民族乐器的研究，我认为：

1)继续研究改进现有民族乐器的音质。

2)用科学的方法、手段去研究中国民族乐器，总结民族乐器的特点，并做出理论上的阐明。

3)把民族乐器的研究与计算机结合，如填补外国合成器音色中没有中国民族乐器音色的空白，建立音色库等。

附录：常见乐器的频率范围(Hz)，基频和泛音，括弧里是音质较好的范围：

倍司大提琴	40-1000(60-7000)
大提琴	65-16000(90-8000)
小提琴	200-16000(250-9000)
低音大号	40-8000(60-6000)
长号	80-7000(130-7000)
短号	180-10000(180-8000)
小号	90-8000(160-6000)
大管	60-13000(80-9000)
低音萨克管	50-14000(80-8000)
低音单簧管	80-15000(80-10000)
单簧管	150-15000(150-8000)

双簧管	250-12000(250-10000)
高音萨克管	200-17000(200-12000)
短笛	500-18000(500-9000)
长笛	250-17000(250-13000)
定音鼓	45-5000(65-3000)
大鼓	55-6000(80-4000)
小军鼓	80-18000(90-16000)
钹	300-18000(400-14000)
钢琴	27.5-12000

思考题：

1. 你认为乐器声学的内容应包括哪些方面？随着科学、文化的发展，应该不断发展哪些新内容？

2. 试用某种典型的乐器，如小提琴或长笛或二胡、钢琴等，剖析乐器的基本结构。

3. 说明小提琴（或任一种你熟悉的乐器）的材料与音质的关系。

4. 说明小提琴（或任一种你熟悉的乐器）的结构与音质的关系。

5. 说明小提琴（或任一种你熟悉的乐器）的演奏制作工艺与音色的关系。

6. 说明小提琴（或任一种你熟悉的乐器）的演奏与音色的关系。

7. 写出小提琴、中提琴、大提琴、倍大提琴和吉他的各条弦的基频频率。（按 a^1=440.00Hz，平均律或五度相生律）

7. 试举某一种乐器说明其有关声学参数的具体范围。

9. 你还见到过别的乐器分类法吗？试举出之，并提出你对本书中按发声的物理机制分类的方法的看法。还有哪些乐器是归不进去的？

10. 一根钢丝的单弦，长 65cm，张力为 50kg，要发生 c^1 的基频，问这根弦的粗细是多少？纵振动和扭转振动的基频是多少？已知某种钢的密度是 7.8g/cm³，杨氏弹性模量 $E=2.0\times10^{11}$ N/m²，刚性系数 $G=5\times10^{8}$N/m²。

11. 如果每降低一个八度，钢琴琴弦的直径增加为 16/15 倍，从 c^5 的长度为 5.72cm，直径为 0.875mm 开始，计算 c^1-c^2 这组琴的弦的长度。

12. 大体估算一下：中国曲笛 a^1=440Hz，管长（即从吹孔到 c^1 孔）有多长，如吹孔半径为 0.50cm，音孔半径为 0.45cm，壁厚 0.30cm，管半径 0.90cm，音孔之间距离约为 2.5-4.0cm，则管长的修正项约占百分之几？

13. 试将标准的西洋管弦乐队与中国民族管弦乐队的乐器及效果作比较。

参考资料：

1.《乐器》杂志。

2. Thomas D · Rossing：《The Science of Sound》(1982)。

3. 王沛纶编《音乐辞典》。

4. Stanley Sadie ,《The New Grove Dictionary of Musical Instruments》(1985)

5. 中国艺术研究院音乐研究所:《中国乐器介绍》(1985)

6. 赵松庭:《笛艺春秋》,浙江人民出版社,(1985)年版。

7. E. Leipp:《声学与音乐》(Sound and Music)。

7. John Askill:《Physics of Musical Sounds》。

9. T. 弗里德, 明瑜译,"乐器评传",《乐器》1980 年 4、5、6 期。

10. 田泽林:《略论乐器的声学参数》,《乐器》,1983 年 5、6 期,1984 年 1 期。

11. 关肇元:《乐器分类标准》,《乐器》,1982 年 1. 2 期。

12. 黑泽隆朝,修哈译:《图解世界乐器大事典·序言》,《乐器》1984 年 5 期。

13. 中国艺术研究院音乐研究所:《中国乐器介绍》,人民音乐出生社 1985 年版。

14. 龚镇雄:《歌曲手风琴伴奏的编配》,人民音乐出版社,1985 年版。

15. 王湘:《民族乐器的声谱及音质评价问题》。

16.《简明不列颠百科全书》。

17. Anders Askenfelt:《Five Lectures on the Acoustics of the Piano》Royal Swedish Academy of Music No 64,1990.

18. Johan Sundberg:《The Science if Musical Sounds》,Academic Press,1989.

第八章　歌唱声学

§8.1　引言

8.1.1　歌唱的音乐

歌唱是人声唱出的音乐。这是一种最古老最自然的音乐。一个人只要不是发声器官有严重生理缺陷，就都能够唱歌。乐器的发声和人声的歌唱，是音乐的两大主要组成部分。虽然世界上的乐器有千种百类，但歌唱有其独有的特点和魅力。

人体各个器官就好像一件乐器。有人把它比喻成一件管乐器，也有人把它比喻成一件簧管乐器，还有人把它比喻为簧振乐器。但是不管怎样，人体这件乐器是一件世界上最灵巧而又最复杂的乐器，可以随身携带随时歌唱，不需要调弦。人的发声机制复杂，在各种不同情况下靠什么发音至今还没有定论；人的各个部件如喉头、咽腔、声带、胸腔、腹腔、口腔、鼻腔等都是可以变化的，有各种不同的运动状态，而且是由不同的肌肉群和神经控制的。

显然，以上这些与生理学、生物学、心理学、美学、音乐等都有关。

本章将主要从声学的角度，即从歌唱发声的生理基础方面作一些扼要介绍，而不去深究心理学、生理学或解剖学；也不去专门讨论声乐一使你的歌喉发出悦耳的歌声的学问和训练方法。

歌唱的音乐多数是有歌词的，所以这本身就包括了语言声学的一部分内容，我们这里只讨论有关歌词与音乐结合的问题。

唱歌时通常是有伴奏的，这是一种声学环境，也要加以讨论。另外，还涉及其他一些歌唱的环境问题。

由于歌唱不仅是一种机械的或纯技术性的活动，还是人类表达感情、沟通情感的一种方式，所谓“以声传情”、“声情并茂”，就是说，人的歌唱还要涉及一些歌唱心理问题。

8.1.2　对歌唱发声的要求

唱歌是抒发或传递感情的一种行为。虽然讲话也总是希望嗓音动听些、甜美些，但把字音听清楚总是最重要的。而唱歌，特别是作为一门表演艺术的歌唱，则除了吐字清楚以外，嗓音的高低、音量的大小、音质的刚柔、音色的甜润乃至富于情感等，都是重要的。有人提出嗓音要“脆”、“亮”、“响”、“甜”和“美”，有人则提出“清纯”、“丰满”、“圆润”、“均匀”等。但归纳起来，好的唱歌的嗓音应具备以下方面的条件。

1)有足够的响度。让场内的人都听得见；

2)有一定音域。高音上得去，低音下得来；

3)音准。唱歌首先要把音高唱准，然后才谈得上其他；

4)平匀。发某一个音要保持得住；

5)纯净。不含或少含杂音，这是声音优美动听的必要前提；

6)圆润。我国古代有“珠圆玉润”之说，讲声音要丰满、柔润；

7)甜美。所谓“巧笑倩兮，美目盼兮”，指声音富有魅力，耐听；

8)可以控制自如。唱歌的强弱、高低、变化要运用自如，歌声有“弹性”；

9)吐字清楚。歌词与音乐结合得好；

10)穿透性强，可以把声音送得很远；

11)富于情感。

§8.2 人体乐器

8.2.1 人体中与发声有关的器官

图8-1和图8-2是人的头部、咽喉及胸部的一些与发声有关的器官的示意图。这些器官都是由许多骨骼支撑着并由肌肉控制的，肌肉的运动又靠神经的指挥。图中a是气管，b是食道，c是声带，d是假声带，e是会厌，f是咽腔，g是软腭，h是口腔，i是鼻腔，j是舌，k是舌骨，l是唇，m是胸腔，n是喉结，o是小舌，p是颈椎。



图8-1 头部与发声有关的器官(一)

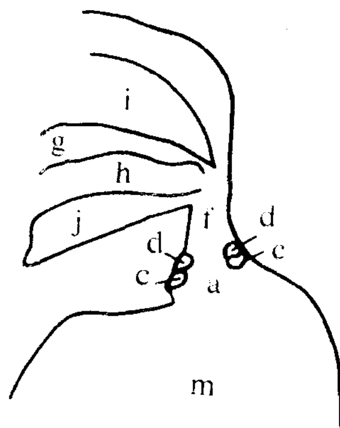


图8-2 头部与发声有关的器官(二)

8.2.2 “人体乐器”的构成

与其他乐器一样，“人体乐器”也由动力部分一气息源，发声部分和共鸣部分组成。

1)气息源

不论是把人体看作管乐器或簧管乐器或簧振乐器，都有一个气源，通过呼吸控制横膈膜的运动，自下而上的把气息“冲”上去，或“顶”上去，使声带振动或在咽腔里发声。科学的歌唱训练都把呼吸运气看得很重要，要在腹腔以上形成一个气柱(图8-3)，不管是发声强弱，共鸣大小，都要用“丹田”之气把气息顶上去，冲过声门。美声唱法强调呼吸，我国古代也有“以气托声”的说法。

“人体乐器”气息排出量的大小，或由腹肌控制，或由喉节、声门的闭合及舌根与咽挤卡决定。

2)发声部分

这是指喉头、咽腔和声带，还有舌头、舌根、下巴等。从丹田上冲的气息冲过声门，使声带振

动，并在咽腔里回转，带出声音来。发声时，下巴、喉头、上下腭、面颊、唇、舌、牙等都在不断变化和运动。例如，在有些唱法中，从发低音到高音到假声，喉头不断上抬。

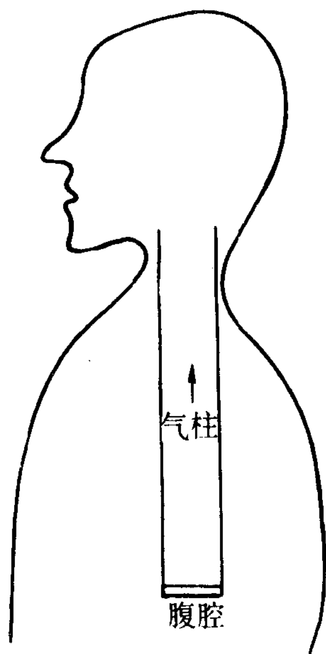


图 8-3　人体乐器的气息源

3）共鸣部分

歌唱时，头部眉眼以下、牙床以上、两腭的小窦腔之内形成一个"面部盒子"，不论是高音、中音还是低音，主要的共鸣区就在这一个"盒子"里，喉腔、咽腔、鼻腔和口腔是直接起共鸣作用的。另外，胸腔、头部软腭以上、前额、两颧部分也有共鸣作用。把软腭以上的部分叫做上部共鸣机构，软腭以下的口腔、咽腔、喉上部等处叫做下部共鸣机构。下部共鸣机构主要对基频共鸣，上部共鸣机构则对泛音起共鸣。发低音时还要加上胸腔的共鸣。

4）其他部分

除以上所述之外，人在歌唱时，实际上是在作全身运动。肢体的动作常常是同歌唱协调的。另外，每个人在歌唱时通过骨骼或再由外面从耳朵把自己的歌声传入耳朵里面的听神经，听到自己的歌声，即是以反馈信号再来控制和调整自己的歌唱；还要以眼睛看歌谱，或是凭记忆，记忆歌谱歌词；要思考；要传达感情等等。因此，"人体乐器"工作时实际上是人全身的活动。

8.2.3　"人体乐器"的特点

综上所述及前面已经讲过的，"人体乐器"有以下特点：

1）它是一种没有定形的乐器。因为每一种器官都可以通过肌肉等调节，使它在一定程度内改变形状，并处于不同的运动状态。

2）它是一种可以自由控制和改造的乐器。由人的思想通过神经系统控制人体的肌肉群，使人体乐器产生千变万化的声音。因此，"人体乐器"的发声是可以训练的，每个人都可以通过训练改善自己的发声。

3）它是因人而异的。每一"人体乐器"都各不相同，发出不同的音色。它没有统一的规格，也没有模子可以复制。

4）由上所述，可以得到结论，"人体乐器"的潜力是无限的。它可以开发出无穷无尽的、前所未有的新的功能，如口技，用口哨吹出双音等，它可以创造出越来越好的声音，使人们越来越方便地掌握它。

§8.3　歌唱的发声原理

歌唱的发声原理是什么？有人认为基频的产生是靠声带振动发声的，即类似簧振乐器；也有认为是以咽腔及口腔的"发音管"发声为主的，类似于有簧管乐器；也有认为是声带与气柱同时决定发声的基频的簧管乐器。

8.3.1 声带发声

1)声带(Vocal Cord)的结构

声带的生理结构我们极其简略地介绍如下:声带在气管上部的喉头里面,在会厌之下,是两条很短的带,与喉头连在一起,表面有一层粘膜。图 8-4 是从上面看下来的声带状况,a 是披裂骨和披裂肌,b 是甲状骨,c 是声带,d 是环形骨和环形肌,e 是声门。图 8-4(a)是两声带松开的状态,(b)是两声带相互靠近的情形。披裂肌控制两声带的靠拢状况,即声门的大小,环形肌和甲状肌及披裂侧肌控制声带的松紧。

女子的喉器官比男子小,声带短而窄,男女喉器官的参考数据如下:

	长度(mm)	宽度(mm)	前后径(mm)	周围(mm)
男	44	43	36	136
女	36	41	20	122

男子的声带约长 15～22mm,女子的声带约长 11～15mm。

声带如有损伤,如长癌,长小结,有结核、息肉、伤痕、梅毒或过于疲劳等,都会使声音沙哑。

2)声带的发声

靠声带发声的理论认为,声带有如簧振乐器的簧片,靠声带的振动而发出声音来。声带绷得越紧,即张力越大,或声带越短,则发音越高;反之,声带放松,张力变小,声带变长,则发音就低。女声比男声发音高,是因为妇女的声带较短。音量的大小首先取决于声带振动的幅度。实际上,是声带与附近的舌、唇、齿、腭、颊等器官一起振动发声。

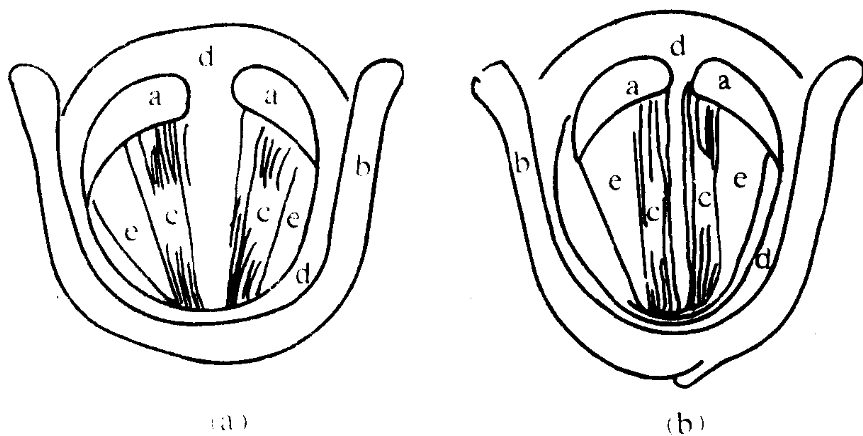


图 8-4 (a)声带松开,(b)声带靠近

假声带是不发声的。

声带的运动,除了拉紧或放松以外,还有张合运动,即两条声带间的距离可大可小,发高音、强音时距离较小,发低音、弱音时距离较大。另外,声带除了相向张合(图 8-4)外,还绕某些点作旋转(角)运动,如图 8-5 所示。

同时,声带的厚薄也在变化。发高音时,声带的边缘处变薄。

3)声带起振的原因

使声带起振发声的原因有两种说法：一种认为是直接由神经系统控制，按人的大脑的意向振动，即主动振动；还有一种认为是由下而上的气息很快通过声门，由于流体力学中的伯努利原理，流体运动时产生负压，把声带"吸"拢并发生振动，即被动振动。

4)真假声

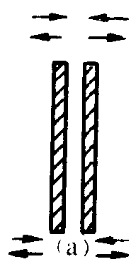
在发很高音时，声带能力达不到，假声带压迫声带，可以发出假声。一般歌唱由低音到高音是从真声、真假结合到纯假声唱法。一般认为，女声以 d^1 为真假声的转换点为好。当唱歌以真声为主时，歌声有力；当唱歌以假声为主时，歌声纤细。

西洋男低音用真声，男高音用"真假结合"的音区。西洋女声在高音区用纯假音。我国京剧中老生和花脸唱低音时用真声，唱高音时是真假结合，小生在唱高音时用假声小嗓，花旦、青衣不论高低都用假声。越剧、沪剧、淮剧等只用真声。还有的剧种，如河南梆子和河北梆子，女声低音用真声，中音用真假结合，高音用纯假声，但有时高音唱响时也用真声，低音弱音用纯假声。真假声在频谱上也是有差别的。

8.3.2 "音管"发声或"音管"与声带同时发声

有人认为，"人体乐器"是一种有簧管乐器，声带起起振作用，而音高则决定于咽腔及口腔内形成的"音管"。如图 8-6 所示，从声门到嘴唇约有 17.5cm 长，就好像是一个喇叭，可以把咽腔调成管状的共鸣室。

有人认为，会厌后倾与喉头咽坠形成一个"倒漏斗形"的管腔(图 8-7)，就像口哨的发声原理那样，把咽腔和口腔调成一个吹风的管柱，发出不同的带有共鸣的声音来，因此是一种管乐器，声带只起起振作用。



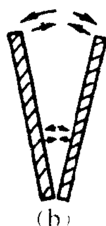


图 8-5 声带的(a)相向张合运动(b)角运动

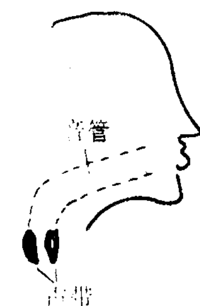


图 8-6 声带与音管



图 8-7 倒漏形管腔

也有人认为是声带与音管同时决定音高，因此是"簧管乐器"。有人做过实验，美声歌手唱到最高音时，在声带缩短、边缘变薄的同时，喉头的咽部全面收缩成为细管状，其直径是喉器官的六分之一。这至少说明音管是起作用的。

§8.4 唱法

我们一般所讲的唱法就是唱歌和训练发声的方法。各种不同的唱法有不同的发声机制、歌唱音区、共鸣部位、发声技术、训练方法并产生不同的音质、音色。随便的扯着嗓子用喉咙喊也算是一种唱法，但我们且不去讨论它。下面介绍几种最见的唱法及其效果和物理基础。

8.4.1 西方美声唱法

西方美声唱法是西方科学的训练歌唱嗓音方法的统称，常以意大利美声唱法为代表，实际上，欧洲各国，如法国、德国、俄罗斯、英国等的美声唱法各有特点，每位歌唱家的唱法也不完全一样，甚至相差很远，形成各自的风格。

西方美声唱法强调呼吸的作用，意大利美声唱法认为“懂得了呼吸的奥秘，就懂得了歌唱”，要把歌声”唱在气流上”；著名的意大利歌唱家帕瓦罗蒂(Pavarotti)也说过：“掌握不好呼吸，就无法唱出好听的声音，甚至还会破坏嗓子。”

呼吸的方法有“端肩法”，即双肩上抬，锁骨上提，从而挤卡喉头而发声；有胸式呼吸法，即除了双肩外，胸部也上抬，也是挤压喉头发声。以上这两种呼吸方法都是不好的，缺乏高泛音共振，音量不大，音色不好。美声唱法用腹式呼吸法，即利用横膈膜上推把气息顶上去，这种方法是科学的。这样呼吸音量大，有弹性，有韧性，从横膈膜到喉节，整个胸腔都可对低位音起共鸣作用。

“咽音”唱法也是一种美声唱法的练声方法，根据林俊卿先生描述，这是“用抬头方法把口张开，下巴后退，嘴唇翘起，舌头顶在下门齿后面，舌后部挺高，用‘吓唬’人的气息使声音冲上两眼眉心，带上鼻音”。这里不仅是呼吸方法，还兼有喉、口、唇、舌及面部器官的动作，一般是喉位下放，咽腔打开，软腭上抬，舌位放低，使口腔张开得较大等。

美声唱法注意鼻腔和咽腔共鸣，共鸣区靠前则高音出来，共鸣区靠后则低音好。

下面列出男声和女声歌唱的频段。女声比男声高一个八度；男声或女声即使频段相同，音色也不同。

声部	男低	男中	男高	男唱女声	女低	女中	女高	花腔女高
f(Hz)	72-288	88-352	104-416	128-512	160-640	192-768	240-960	288-1152

8.4.2 共振峰

在频谱上，会出现某些能量(或声压级)特别高的频段，中间有一个峰值，称为共振峰。用科学的发声训练，可以在声道中制造出一种对应一定频率有较大振幅的共振腔。由于共振峰附近的能量集中，所以对于这些频率，声音的穿透性强。

受过声乐训练的演员与一般人说话或唱歌的不同在于前者多一个或几个共振峰，尤其是在2500Hz附近。有人认为2500Hz的共振峰是歌唱音色明亮的物理保证。共振峰的出现表示有丰富的谐波，所以歌唱家唱歌的音色要比普通人好。如图8-8(a)是普通人讲话的频谱包络，图8.8(b)是歌唱家唱歌的频谱包络。

有人提出在1.8kHz到3.8kHz这个区间内出现2个至4个共振峰是歌唱音色好的标志。

据报导，改变从声门到嘴唇这段声道的长度和形状，可以在500Hz、1500Hz、2500Hz、3500Hz附近获得第一至第四个共振峰。声道越长，共振峰越低。研究报导指出，放松二腹肌、前腹肌和颏舌骨肌，用放松下巴的办法张口，可以使靠近声门处的声道缩小，靠近嘴唇处的声道扩大，从而求得第一共振峰(500Hz)；将舌体平放于口内，可得第二共振峰(1500Hz)；舌尖抵住下牙内根，把舌面前三分之一放成横沟状，可得第三共振峰(2500Hz)；而把舌面两侧凸卷，中

部凹下形成直，沟可得第四振峰(3500Hz)。

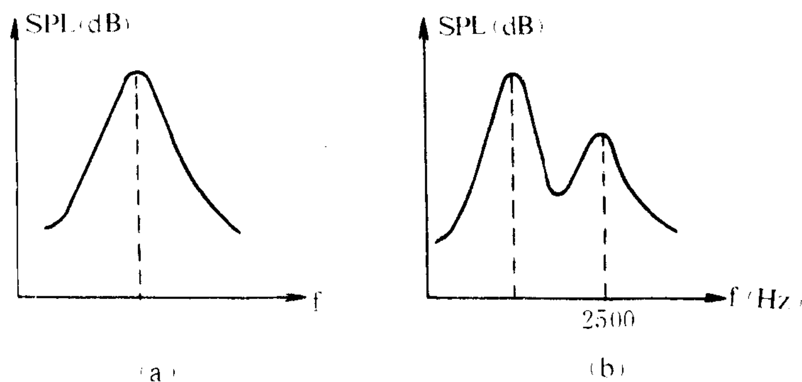


图 8-8 频谱包络(a)普通人讲话(b)歌唱家唱歌

8.4.3 颤音(Vibrato)

在美声唱法中，每个音都有自然的音高的颤动，即发声频率的上下变化，以增加声音的美。

声音的颤动会随歌声强弱和感情而变化，这就增加了歌曲表现力。颤动以每秒种 6 次左右为好，颤动的频率变化大小与歌声的强弱有关，声音越强，音高的"抖动"也越大，最高可达 200～300 音分，一般也有 60 音分以上(见本书第四章)，而且因人而异。

颤音不仅单纯由呼吸肌肉的抖动而产生，实验证明，在声音发生颤动时，甲状骨也在跳动，这些都是由神经系统指挥的。

也有的理论认为，颤动是由于气息冲击声带，引起声带有节律的拍打而造成的。

8.4.4 中国美声唱法

中国的美声唱法基本上是学习西方美声唱法，但是又根据汉语发音的特点而有所变化。另外，中国的美声唱法从广义上来说还包括在西方歌剧和艺术歌曲的美声唱法的基础上，相当大程度上融合了中国歌剧、艺术歌曲以及某些民间、戏曲唱法而形成的民族唱法。中国美声唱法也强调腹式呼吸和科学的发声训练。

一般讲来，中国的美声唱法同西方美声唱法一样，喉位较低，扩张咽腔和口腔，使 2500Hz 左右的共振峰得到加强。但是较西方美声唱法声音位置靠前，音量较小，但脆而亮，口舌运动幅度不大，歌唱语言清晰。这显然与汉语发音的元音舌位较高，高元音的分布概率较大，元音声道较短、截面较小有关，也与汉语的辅音有送气、不送气之分，长辅音丰富，清辅音的种类和出现概率较大，塞音、塞擦音无清浊对立等有关。

中国的语言的四声问题，戏曲里的咬字、吐字方法等，必然并且已经影响到中国美声唱法。实际上，有些名为"民族唱法"的歌唱家，美声唱法占有了相当多的成分。

8.4.5 中国戏曲和民间唱法

我国很早就有关于唱歌、唱戏方法的论述。元代燕南艺庵的《唱论》中论述了"歌者声气"；明朝魏良辅的《曲律》中记述了"歌者"学习唱歌的方法；沈宠绥《度曲须知》记述了四声的唱法，字音反切方法，出字、收音方法等；清徐大椿《乐府传声》论述了发声吐字，歌唱收声、收韵以及

歌唱表情等方面的问题。

我国的传统戏曲，特别是唱腔水平发展较高的大剧种如京剧、昆剧、豫剧、河北梆子等都有自己的一套发声和训练方法。相对于"美声唱法"，中国传统的戏曲唱法中高喉音用得较为普遍，随着音的升高，喉头位置上移，声道更短，于是共振频率提高，这样有助于提高汉字元音的发声清晰度。因此，戏曲唱词听起来常常要比某些没有掌握好的西方美声唱法来得清晰、明亮，唱、念也很易连接，音色一致。

京剧中花脸的音色浑厚有力，与扩咽、舌位相对低而靠后有关。这样，扩张了咽腔及声道的截面积，导致共振峰向低频方向移动。小生的音色脆亮，是因为缩咽，升喉，舌头前靠，从而缩小了咽腔。

京剧各行当的音区大体如下：

行当	老生	小生	花脸	青衣	老旦
f(Hz)	165-622	261-699	261-523	392-1046	261-284

中国民间许多民歌的唱法的特点是直声唱法，口语化，多数地区以真声为主。

8.4.6 中国通俗唱法

我国的通俗唱法(又称流行歌曲唱法)可以说是五花八门，包罗万象，还没有形成在唱法上被公认的一个或几个流派。一般来说，其吐字行腔类似口语，用真声，靠话筒演唱；声音没有经过不管是美声的或是传统戏曲的训练；因为有话筒传声和放大，所以不要求音量大，甚至低声细语反而有较好的效果；不必要求元音的明亮，并反而突出辅音。一般的"卡拉OK"歌手，通俗歌星，甚至山歌、小调等，都是这种笼统地称谓的通俗唱法。

通俗唱法从发声机制上看，与汉语语言发声类似，喉头随音高的高低而升降。有测量表明，男女声的升降都在±0.3～0.5cm 之间，略少于传统戏曲唱法的喉部升降。与其他中国唱法一样，发声位置靠前。

通俗唱法一般用的是自然音区，即男声从 124～392Hz，女声 261～699Hz"，音区要比美声唱法窄得多。另外，"气声"、"轻声"、"紧喉声"、"嘶哑声"、"鼻化声"等也都是常被使用的。

§8.5 歌词

8.5.1 歌词与音乐

除了极少数哼鸣(Huming)以外，唱歌都是要唱歌词的。歌词对于一首歌来说与音乐具有同等的重要性。带上歌词的音乐更加易懂，更加容易传达情感和思想，感染力也就更强。歌词的内容越深刻，音乐的内涵也就越深；音乐可以给歌词以美感，而歌词也会使音乐更美妙、更传神。歌词与音乐两者相辅相成，融为一体。没有好的歌词，就写不出好歌来；好的音乐要配上好的歌词，才能广为流传，《长江之歌》就是一个好的例子。

一首好的歌，非但要遵从音乐的规律，又要尊重语言的规律，还要遵从二者结合起来的规律，这就是歌词与诗有区别的原因之一。

有的场合下，相对来说，歌曲中歌词的意义要较小一些，音乐的分量要更重些，如西洋古典

歌剧的某些段落或对白；某些宗教音乐如弥撒曲的词多是一些教义等。但是在多数情况下，歌词与音乐有同等重要的意义。而在说唱音乐或西洋歌剧的宣叙调中，词的分量相对来说要更大些。

有些外国歌曲或歌剧选曲，用本民族的原文演唱的效果比用译词演唱的效果要好得多，这是因为原来的歌曲就是按着本民族的语言特点写的，这也说明要译配好一首歌或一部歌剧是一项难度非常高的再创作。

8.5.2 一首好歌词应具备的条件

一首好的歌词，除了歌词本身的内容、思想、情调、修辞等以外，与音乐的配合上，应该有：

1)歌词的内容、情调和风格与音乐是一致的；

2)歌词美与音乐美融为一体，相互加深，相映成辉，共同起到更好的感染作用；

3)歌词无论在语声、语调、顿挫等方面都与音乐配合得天衣无缝，至少没有明显败笔；

4)歌词口语化，易唱，易懂。

8.5.3 歌词与音乐的结合

根据我国汉语语言文字及发声的特点，歌词与音乐的结合有以下一些做法和需要注意的地方：

1)元音的选择是很有讲究的。有时为了适应某种风格歌曲的特点或是本人歌唱的特点而选择某个元音，如《一无所有》崔健选择元音 ou 求得发声位置靠后和音色的宽厚有力，以符合陕北民歌的风格特点。

2)歌词韵脚的选择也是一种元音的选择，与唱歌的效果有关系。例如京剧中花脸的唱词多用“中东”、“江阳”、“遥条”、“由求”等低、后元音的韵辙，使声音浑厚有力得到支持，忌“一七”、“发花”韵；老生、老旦、青衣发音位置偏高，对“人辰”、“言前”韵更有利；而青衣则因舌位、喉位较高，开口较小，对“一七”、“姑苏”韵较合适。

3)中国语音四声也必须体现在歌词里。一般来讲，第四声是较难唱好的，若放在一句的结束或长音上是很不利的，甚至难于发好音。当然，在某些类型的歌曲里也可以自如地运用，如诙谐歌曲；也或可以作些处理，如在配歌词的音符上加休止符等。

在歌词与音乐的配合上，更要注意四声。如“母亲”两字发音(mū qin)是由低而高的进行，在“长江之歌”里就把原来音乐修改了一下，把下行变成上行，成为 $\underset{\text{母亲的}}{\dot{5}\ \underline{4\cdot 4}}$，就符合行声的规律了。同样，$\underset{\cdot}{5}|1$ 一(起来)，不能谱成 $5|1$ (起来)等。初学写歌者常常会出现“倒字”，即四声弄拧了。

4)要符合重音规律，音乐的重拍上一般应该是语言的重音，但是有的是在重拍上去按上轻声的字，如把“的”放在重拍上：$\underset{\text{我们}}{\underline{23}}\ |\ \underset{\text{的土地}}{5\ 4\ 3}$，在当今粗制滥造的歌曲中是屡见不鲜的，听起来令人别扭。

5)歌词与音乐的配合还体现在歌词的分节分句中。歌词的对仗、排比与音乐的上下句及对比结构等紧密相关。中国的格律诗词和杂剧中的许多曲牌，京剧和一些地方剧种唱词的二、二、

三或三、三、四的句形，都给歌词的写作和词曲结合以很好的借鉴，这里都隐含着汉语的发音、吐字的规律。

6）在词曲配合上，还可以借鉴中国戏曲的一些手法，如京剧中把握辅音与元音的相对时值，故意把一个字的辅音与元音"切开"，拉长前面辅音的时间。这样吐字清晰，更有韵味。又如，汉语的抑扬顿挫对于歌词与歌曲的结合也是适用的。还有，戏曲中休止、急停的运用也是可以参考的。

7）在流行歌曲的演唱中，为了打破电子音乐或计算机音乐在制作时的拍子、速度、音长的过于准确而令人感到机械、呆板、乏味的效果，故意把唱词中的一些字拖延到一拍音乐起始后再"后起"，或故意超前"先起"，可以给歌声带来变化感和活力。

§8.6 歌唱的环境和气氛

8.6.1 伴奏一歌唱的声乐环境

除了无伴奏合唱或其它随便哼唱的山歌小调外，人们在唱歌时总是喜欢有伴奏的。伴奏对于唱歌主要有以下作用。

1）引导

伴奏可以帮助歌唱者掌握节奏、速度和音准；过门可以连接歌曲的段落和句子或进行转调；前奏可以起定调、引入甚至指挥的作用；序曲有定场、点睛的作用。

2）烘托

伴奏可以用旋律或和声作为背景，衬托歌声；伴奏也可以通过对比，如高潮时伴奏停止，以突出歌声；伴奏可以通过丰富的和声或音乐织体，渲染歌声。

3）声势

不仅用大型的管弦乐队或电声乐队伴奏可以为歌唱制造声势，就是很少的几个人，一把吉他，一个架子鼓，或一台钢琴，一架手风琴，也能制造出声势来。

4）补足

这里既包括用伴奏遮盖一些歌唱者的毛病或不足，如高音气息不足，强度、音量不够，有些音唱不准等。也可以在歌唱长音时加入衬奏或支声以减少单调感，或者是让歌唱者有一个休息的间隙。

5）揭示

伴奏可以帮助你揭示歌曲的内涵，使你的歌声更加易于找到感觉，或使人对歌曲有更加深入的理解。

6）传情

归根结底，伴奏可以使歌声更好地表现和传递感情。伴奏者的感情溶化在乐器声中，融合在歌声中，使歌者和听众一起进入更加美好的感情世界。

但是，伴奏不能喧宾夺主，不要在和弦的处理上与歌唱"打架"，不要在风格上与歌唱径庭，也不要节外生枝，画蛇添足，而破坏整体情绪。

8.6.2 动作、表演、舞台一歌唱的空间环境和心理环境

1）肢体的动作，有时是唱歌发声的协同动作，如抬头，扬眉，沉颚，张口，收腕，甩臂等。

从表演的观点看，有许多肢体动作除了可以帮助演唱者发声外，还可以增添整体美。眼神、笑容、手势、人体位置的移动、舞蹈、风度以及一些其他表情、姿态和动作，都可以更有利于传递歌的感情，并从整体上增强艺术的美感。

2)在舞台上演唱时，舞台灯光、场景，演员的服装、化妆、伴唱、伴舞等都起着烘托和渲染歌声的作用。在大厅里歌唱，要考虑到室内声的效果，这在第十一章中还要进一步讨论。

3)如果你在教堂里唱赞美诗，那歌声会把歌唱者本人也带入一个"净化"的天国境界。这与环境的气氛和建筑声学都有关，并已经涉及到心理环境。

4)如果你在一望无际的原野上引吭高歌，或者在水边听着细细的涛声吟唱，或者是为缅怀你最亲密的朋友而歌唱，或者是傍晚在情人的窗台下抱着吉他弹唱，这些宏观的环境已经形成了你的心理环境，将会使你用心来歌唱，唱出更加美好动人的歌声。

§8.7 歌唱声学的研究

8.7.1 歌唱声学的研究方法

1)实验方法

很早以前，就有人用声谱方法研究频谱特点，波形特点，或者直接用摄像机记下声带、声门、各部分肌肉、骨骼的运动状况进行研究。这些目前还在沿用。

2)经验方法

迄今为止，虽然已经有许多理论解释了歌唱发声的原理，而且也已经建立起一整套科学的训练方法，但是歌唱家和声乐教师通过自身的实践、体会和感觉，积累成为经验，个别的传授，还是目前最常用的研究方法之一。

3)计算机模拟方法

这是最近一些年来开展的研究方法。先提出物理模型，如已有说明声带运动的双质量振子模型、声门扇状开合模型等，模拟研究气流通过声带所形成的场及能量分布，受力状况，声带形变等。

8.7.2 对一些需要研究解决的课题的建议

歌唱的声学还是一门被研究得很不充分的学科，可以而且迫切希望解决的是：

1)进一步弄清楚歌唱发声的机制，从而找出科学发声训练的更有效的途径；

2)发展更有效的研究歌唱声的方法和手段，如能研究和表现更细微唱歌过程的手段；

3)找出影响歌唱发声质量的最主要的参量，提高歌唱发声训练的效率；

4)找出评价歌唱发声质量的宏观量，把评价歌唱音质更多地放在客观的科学的基础之上；

5)科学地研究我国各种民间及戏曲唱法的发声机制和音质特点，汲取其中科学合理、行之有效的成分，把戏曲发声的训练进一步放在科学的基础之上；

6)发展我国自己民族的和各种流派的唱法；

7)汇集西洋各国美声及我国已有各种民族、民间及戏曲唱法之长，完善我国自己的民族唱法。

思考题：

1)人的歌唱与乐器发声机制有哪些是相同的？有哪些是不同的？

2)据报导，现代有些喉癌患者在摘去喉头包括声带以后，还能练习发声讲话，由此，你对人的发声机制作何解释？

3)你认为，从我国一些戏曲的发声方法及唱法中，能吸取些什么优点来作为我国歌唱唱法的特点？

4)你能举出一些歌词与曲调配合得好与差的例子吗？

5)你对中国歌唱唱法的发展有何看法？

参考资料：

1 林俊卿：《歌唱发声的机能状态》，人民音乐出版社，1975 年版。

2. 王宝璋："咽音、咽音练声体系，咽音用于艺术歌唱"。《音乐周报》。1990。

3. 马大猷、沈豪、《声学手册》，科学出版社，1987 版。

4. 傅显舟："汉语唱法及汉语语音"，《音乐周报》，1990。

5. 龚镇雄：《歌曲手风琴伴奏的编配》，人民音乐出版社，1984 版。

6. Carl. E. Seashore：《In Research of Beauty of Music》，1946 年版。

7. 王士谦："Singer's High Formant Associate With Different Larynx Position in Styles of Singing"，J. A. S. Jpn. (E)7，6(1986)。

8. Johan Sundberg：《The Science of thd Singing Voice》，Nouthern Iuinois university Press，1987.

第九章　音乐电声

§9.1　引言

9.1.1　电声学（Electroacoustics）的基本问题

声是我们每人每日每时都会遇到的。当前，除了自然声以外，电声越来越多的进入了我们的工作、学习和生活，而且占有越来越大的比重。

电与声关系密切，利用电声元件可以对声进行接收、传递、调制、放大；电还可以产生声，包括可闻声和超声、次声等。电声还常与机械或与光结合，成为机→电→声和光→电→声系统。电声问题基本点是：

1）换能。包括声→电→声换能或电→声换能。这里包括有电话，收音机，传声扩声系统，音响系统及电子音乐等。

2）调制。广义的说，是声信号变成电信号以后的加工，包括放大，均衡，自动增益，负载调整，降噪，人工混响，人工延时，响度控制，信号压缩等。

3）电声与听觉的结合。用电声方法去适应听觉特点，取得好的听觉效果，如立体声效果，人工头话筒，高保真问题等。

在处理电声问题过程中，又会产生许多实际问题，如阻抗匹配，部件组合，失真与保真，环境因素的影响，实用性，成本等等。

9.1.2　音乐电声（Musical Electroacoustics）的内容

由于电声中音乐声占有重要比重，并且许多换能和调制系统既可用于语言声或其他声，也可用于音乐声，还有，音乐声往往比仅仅传达语言声有更高的或特别的要求，许多电声上的前沿问题常常是从音乐电声提出的，因此，音乐电声在整个电声学中占有重要的地位。音乐电声讨论所有与音乐声有关的电声问题。

把电声问题具体化，落到音乐电声上，无非是要能让人们听到优美的音乐。这里有三个环节，一是音源，二是经过的电声系统，三是重放系统，这三个环节中哪一个出了问题或是质量不高，都会影响最后的效果。于是，这里就有个如何保真的问题。由于经过了电声系统，所以声音可以有人为的加工，即可以使音质、音量等比原始的声音更好。

除了音源（Sound Source），通过系统（Transmission System）和重放系统（Reproducing System）以外，对于人的听感来说，还有一个听音对象的问题以及环境问题。因此，对于音乐电声，一共有音源、经过系统、重放系统、听音对象（Listener）及环境（Enviroment）五个要素，它们围绕的总的目的是保真和改善音质的问题，用框图表示它们之间的关系如图9-1：

由于音乐电声已经进入日常生活和每个家庭，我们将多结合实际生活中经常遇到的问题来进行讨论。

具体说来，音乐电声的音源包括人通过传声器的直接输入或录音，录音磁带，电唱机和唱片，激光唱片或激光视盘，高密度视盘，数字音源，广播和电视的接收系统，以及电子琴

的振荡器、音源片等。总之，是把音乐信号变成电信号，或者是直接产生能放出音乐声的电信号及其贮存问题。

音乐电声的电信号要经过混频、放大或加工，包括降噪、自动调制、增益均衡、人工混响、延时等。

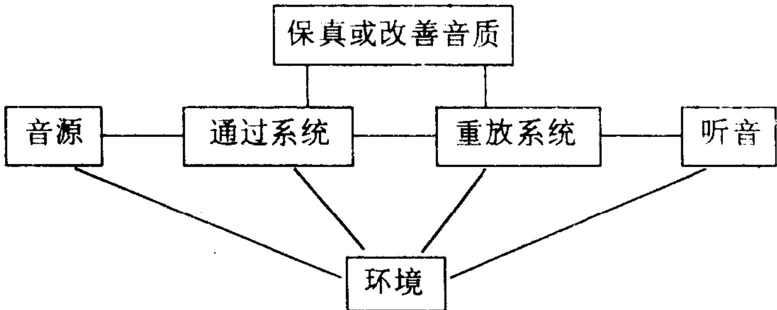


图 9-1　音乐电声第统

音乐电声的重放系统包括音箱和耳机。

听音的问题包括各人的听觉灵敏度不同以及对音乐评价的个人标准问题。

环境的问题和录音或拾音条件、听音条件的问题包括房间的影响、音箱位置和人在什么环境中听音乐的问题。

立体声效果，高保真问题，以及电子乐器，等我们将作为专门的问题来讨论。

电子合成器和计算机音乐也是个电声问题，我们将另在别的章节中讨论。

上述提及的有关音乐电声的内容和问题的大部分，几乎都包括在一个高水平和高质量的家用音响系统及其布置、使用的问题之中，下面我们将分别予以讨论。

§9.2　传声器（Microphone）

传声器也叫拾音器，麦克风，话筒，送话器等。无论是录音、灌唱片、即时传声扩大或“卡拉 OK”等，都要用传声器。

9.2.1　传声器的作用

传声器是声收集器和声换能器。传声器是一种能把声能转换为与声能具有基本类似的波特性的电能的装置。

1876 年贝尔（A. G. Bell）第一次试验成功流体传声器。这是一段短于一吋的金属线，放在溶有酸的水中，在导线的另一端系上一只可以被声波激励而振动的膜片。当声音激起膜片振动后，使水中的金属丝振动，从而改变了通过电线和水的电流，使声音变成了同步振动的电振动。1861 年菲力普 · 雷丝（Philip Reis）制成了第一台电话机。1873 年依力沙 · 格雷（Elisha Gray）第一次实现短途电话。1878 年赫格斯（Hughes）发明第一个实用的传声器。

传声器的基本要求是：

1）换能：由声能转换成电能。拾音器反过来就是扬声器。简单的情况下，拾音器与扬声器可以换用。

2）要能："跟得上"，即能实时传声。

3）不失真或少失真。

传声器对不同频率有不同的反应。要区别频段。录音或扩音或通讯时，第一步就是通过传声器。通过传声器的信号要尽量少失真，包括不要丢掉信息或增加非信息的噪声。

9.2.2 各种传声器的工作原理和优缺点

下面介绍几种最常用的传声器的工作原理：

1）电阻性传声器（Resistance Microphone）

碳粒传声器（Carbon Cranule Microphone）是最古老的一种传声器。图 9-1（a）中是接收空气声振动的振膜，b 是前电极，c 是碳粒，d 是后电极，e 是与音频放大器输入阻抗匹配的传声器输出变压器。振膜振动时，使碳粒与后电极之间的换能电阻改变阻值，从而改变电路中的电流，亦即使变压器输出的交变电信号与输入的声振动同步，实现了声信号转变为电信号。有时碳粒也做成碳片或碳片堆。

这种自放大式换能器可以有 50dB 的增益，价廉，耐用，易制作，但杂音高，易老化，不稳定，可以在 50～5k 频段工作，常用在通讯电话中。由于频段很窄，谐波失真很大。你会发现，一个人的声音在电话中常常与实际说话差别很大。还有，它们的截止频率很高，300Hz 以下的声音基本上被滤掉了。

另一种电阻传声器是应变型的。细小的金属丝或半导体丝的机械应变产生电阻变化，从而调制电流。这种传声器的输出低，用于高声压的信号。

2）电容性传声器（Condenser Microphone）

二十年代中出现的电容性传声器的工作原理如图 9-2（b）所示，空气振动使导电薄膜 a 振动，从而改变它与金属板 b 之间的电容，导致改变极板之间的电压，实现换能和调制。

电容性传声器的优点是频响好，失真小，指向性好，由于膜片很薄，瞬态响应好，噪声小，轻巧，可控制阻尼，滤掉不需要的机械噪声。

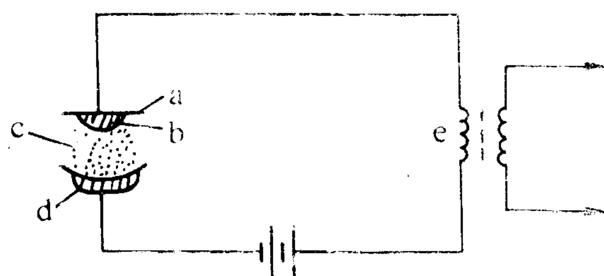


图 9-1（a） 碳粒传声器原理

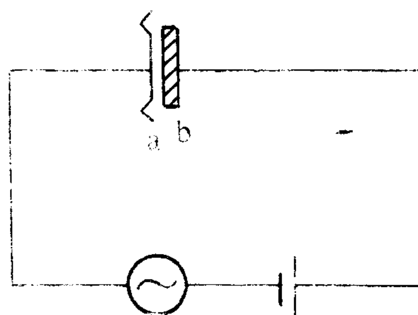


图 9-2（b） 电容性传声器原理

电容性传声器要求的偏压高（50～200V），必须用高阻的电缆传输，与高输入阻抗的放大器匹配，且金属膜与背板之间如果有少量水珠、灰尘，则会大大增加噪音或遭击穿。使用驻极体可以大大减低偏压。

3）电动式传声器（Dynamical Microphone）

电动式传声器有一种是带式的，如图 9-3 所示，在永久磁铁两个磁极 N-S 之间挂有一根金属带 a，带的两端固定，带身可以自由运动。空气中的声振动使金属带振动，从而磁场中的

运动物体切割磁力线，产生金属与带运动的速度成正比的感应电动势。这与发电机原理一样。

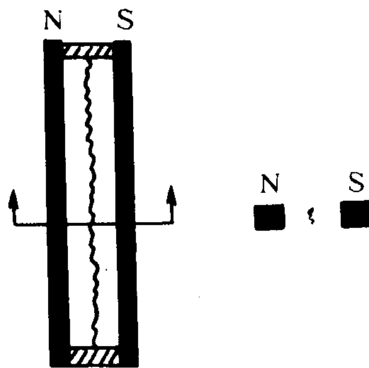


图 9-3 带式电动式传声器原理

电动式传声器的优点是指向性好，高频性能好，切低频。手持话筒时，即使很贴近，也可切去嗡嗡声，适用于高声压(130dB)。缺点是输出电压低，比较娇气。

如果把电动式传声器做成动圈式的如图 9-4 所示，a 是振膜，b 是线圈，c 是磁铁铁蕊，用以增大感应电动势。它不娇气，稳定性好，频响好，输出电平高，且价格低，但灵敏度较低。

电动式传声器还有动铁式的。

4) 压电式传声器(晶体传声器)(Crystal Microphone)

压电式传声器用的是压电晶体。在图 9-5 中，声振动从膜片 a 通过驱动针 b 使晶体 c 发生形变，产生交变电压。最常用的压电晶体是钛酸钡压电陶瓷。

压电式传声器的优点是增益大，输出阻抗高，无需变压器，可直接接到输入放大器放大，体积小，而且可以叠加使用。缺点是频率响应差，高温高湿下易损坏。

其他传声器还有磁致伸缩型等。

9.2.3 传声器的指向特点

利用传声器的指向性 (Directivity)，可以舍取不易控制的外界噪声，可以抑制从墙面反射的混响声，可以对较远距离的声源拾音。

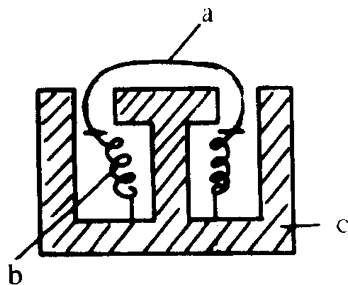


图 9-4 动圈式电动传声器原理

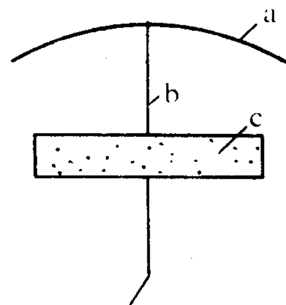


图 9-5 压电式传声器原理

图 9-6 (a) 是传声器的全向图形。0 是指向正前方，轴上标的数字是衰减的 dB 数。全向型传声器用于午台上全方位录音，乐队的总体录音等。(b) 是心形图形，心型指向传声器用于定向接收，常呈长筒形。图中 0°指向是－2dB，90°指向是－6dB，180°指向是－20dB。(c) 是“8”字形图形，这种传声器用于桌子两边的谈话。图中 0°和 180°指向是衰减 2dB，90°、270°指向衰减 20dB。另外还有波瓣形指向，大心形指向和超心形指向等。传声器在各种频率下的指向性能是不同的。

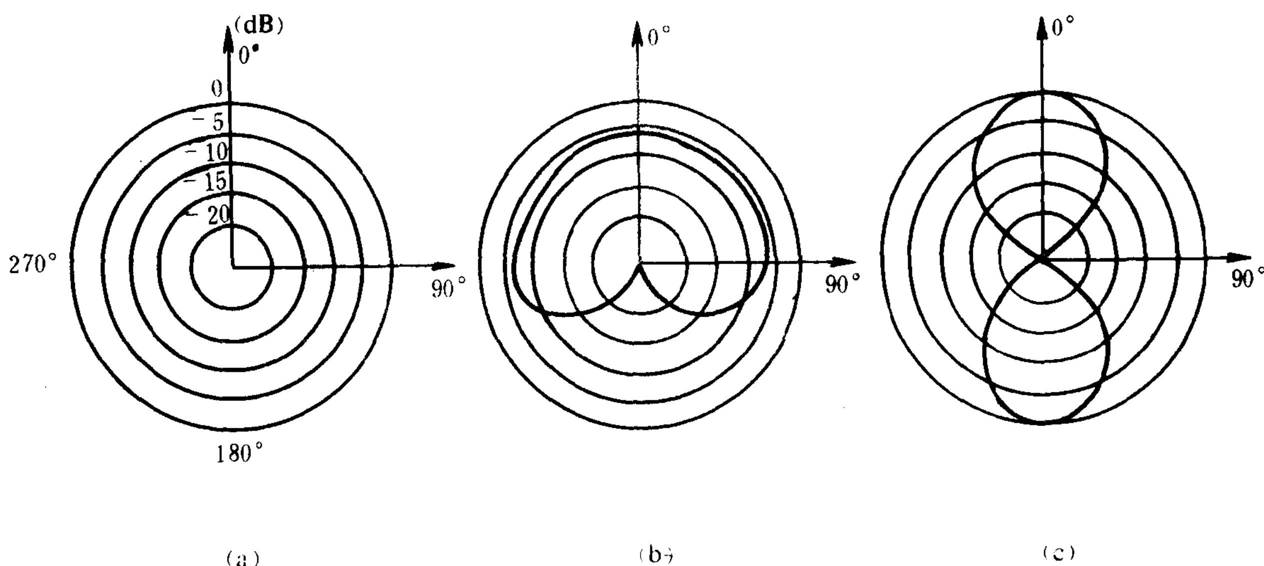


图 9-6 传声器的指向性 (a) 全向形 (b) 心形 (c) 8 字形

9.2.4 传声器的主要技术指标

传声器是整个声—电—声系统的第一步。要求这一步不为以后的进程增加附加的失真。其主要规格和技术指标有以下几项：

1）换能方式。

2）频响。不一定理想的、最平直的频响曲线是最好的，如有时需要压低频、提高频。

3）接近效应。指声源接近时频响的变化状况。这时低频的响应如果增加，则会起嗡嗡声。

4）指向性。

5）1000Hz 下的输出电平。

6）输出阻抗。

7）灵敏度。指 1μPa 声压下的输出电压或输出功率（mv/μPa 或 mw/μPa），与频率有关。

8）瞬态响应。

9）最大声压。

9.2.5 如何使用传声器

1）根据不同用途选用适当的传声器。如一般用单点话筒，为录制立体声节目用立体声话筒，为用耳机听音而录音用人工头话筒，拾取远处声响用抛物面话筒，还有抗噪话筒，无线话筒等。

2）使用时要避免或尽量减小噪声。这包括环境干扰声，乐器击键声，人的呼吸声，墙壁混响声等。

3）保持适当的工作距离。近了，环境噪声少了，但显得“干”；远了，又什么声音都进去了。每种乐器有最佳拾音距离，如弓弦乐器和木管乐器一般距 50～80cm，手风琴距 50～

60cm，钢琴距 1～2m 等。

4）多个传声器一起使用时，有一定的叠合方式。

5）注意声的相位。这是指一个人用多个话筒或多个人使用一个或多个话筒时，为了避免不同步，传声器之间的距离 D 与声源、传声器间的距离 d 间要维持一定的关系，如图 9-7 所示。图中 M 为话筒。

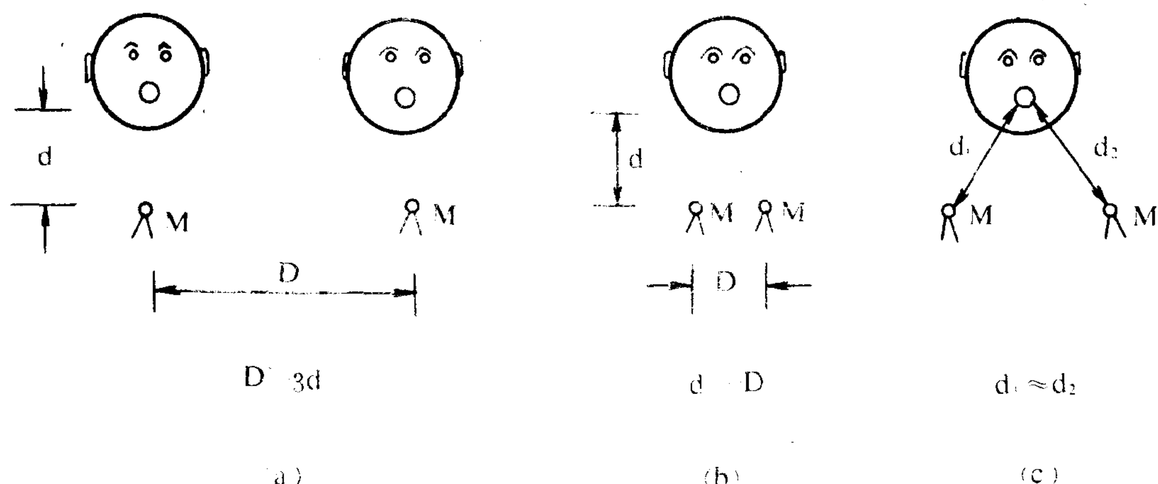


图 9-7 传声器的位置

6）乐队或合唱队使用传声器随演员数目、要求效果、房间条件和乐器（声部）组合不同而变。如独奏要求切噪声，可以用一对心型传声器。传声器放得太近了得到的声音效果像个重型乐器，放得太远了又好像不是独奏。笛子要去掉吹气声，则话筒不可太近。提琴要把传声器放在弓、码附近。铜管要求放在侧边，钢琴要放在音板后面或琴弦旁。合唱时可用传声器弥补声部不平衡。

§9.3 磁带录音机（Magnetic Tape Recorder）

自从 1890 年巴黎博览会首次公开展示磁带录音机以来，它发展很快而且完全普及了。

9.3.1 磁带录音机的种类

1）开盘式。磁带宽 1/4 吋（6.25mm），转速有 38cm/s、19cm/s、9.5cm/s，4.75cm/s。转速越快，录音质量越高，现逐步为盒式录音机所取代。但在高质量的声学研究、录音棚中等还用开盘式磁带录音机。

2）盒式。磁带宽 1/7 吋（3.8mm），小型，便携。最近还发展了新的磁带，使用了杜比降噪等降噪措施，使信噪比小这个磁带录音机的最大的缺点又有所改善。

3）大磁带盒式。音质高于普通盒式，带宽 6.3mm。

4）磁迹式。可以循环播放，多做成单放机，也有录音机，有取代盒式录音机的趋势。

5）其他。如超小型的录音机，但录音乐少用。

9.3.2 磁带录音机的工作原理，磁头

1）录音（Record）

利用磁性材料在外磁场作用后，即使去掉了外磁场还有剩磁这个性能，来记录音乐信号。磁滞回线是非线性的，如图9-8所示。用图9-9表示外加的波形（音乐信号）与记录的剩磁畸变。如果加以偏磁，使工作点在磁滞回线的线性部分，就可以克服波形畸变，如图9-10。加偏磁的方法有直流偏磁和交流偏磁两种。

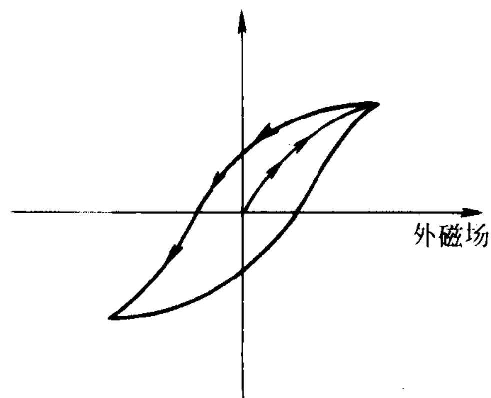


图9-8 磁滞回线

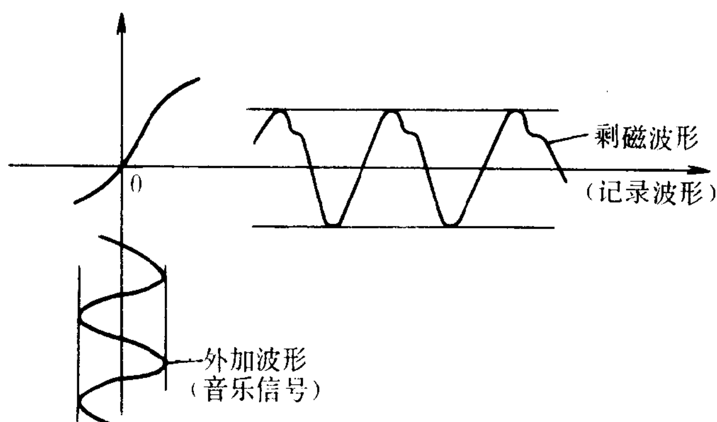


图9-9 在磁滞回线非线性段工作，信号畸变

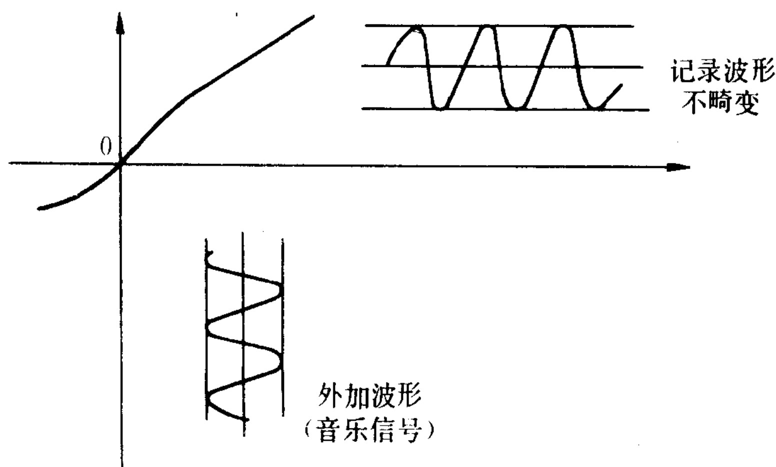


图9-10 在磁滞回线的线性段工作，信号不畸变

2）放音（Reproducing）

如图9-11所示，记录有剩磁信号的磁带a通过放音磁头（Reproducing Head）的隙缝b改

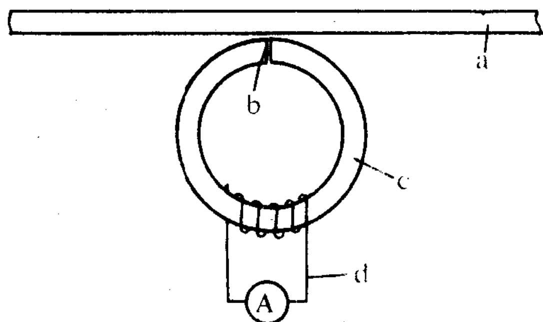


图 9-11　磁头放音原理

变了隙缝处的磁场，通过环形磁铁 c 中磁通的改变，在线圈 d 中形成与记录在磁带上的信号同步的电信号。

放音磁头的音隙约为 1-2μm（盒式）到几个 μm（开盘式），加工精度要求很高。由于得到的是整个隙缝中的平均效果，所以磁带录音的高频性能不是太好。

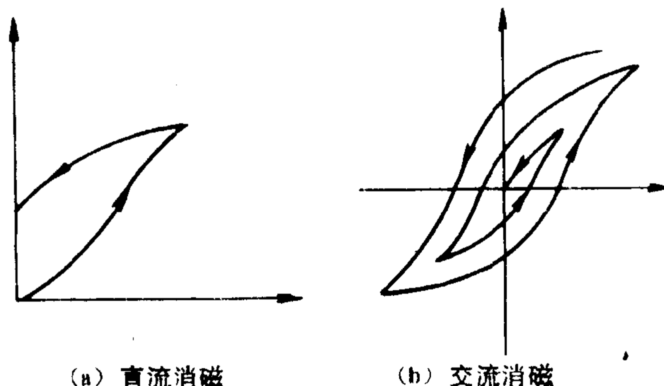
3）消音（Erace）

对磁带的消音方式有两种，一种是直流消磁，把外磁场加大，磁化达到饱和，原有磁化效果就消失，但会留下不很强的直流剩磁，再行录音就会有较大噪音，如图 9-12（a）。

另一种是交流消磁，磁场不断反转，渐趋于零。如图 9-12（b）。

不同用途要用不同的磁头。

录音磁头（Record Head）为了提高效率，常常叠置几个片。放音磁头要特别注意磁屏蔽。消音磁头的缝隙比较宽（0.05～0.5mm），有录、放消共用磁头，其效果会差些。也有磁头组，在一个磁头座上下分别安置不同磁头。



（a）直流消磁　　（b）交流消磁

图 9-12

9.3.3　磁带（Magnetic Tape）

录音磁带是在聚脂薄膜的带基上涂上一层或两层磁载体。常用的磁带种类如下：

1）普通带（Normal Position）。涂层是 γ-Fe_2O_3 磁粉，频响小于 10KHz，动态不太大，价低。LN（Low Noise）带、SONY 的 EF（Excellent Fedelity）带、AD 带是普通带。TDK 的 LH（Low Noise High Output）带也是这种普通带，较 LN 带有较高最大输出电平，高频性能有所改善。这是 IEC 第一种类型盒式带（TYPE Ⅰ）。

2）铬带（C_rO_2 Position）。涂层是 C_rO_2，高频丰富，动态较宽，适用于音乐录音。TDK 的 SF、SA 带，SONY 的 UX 带和 Maxell 的 UD 带等是这类带。这是 IEC 的第二种类型盒式带（TYPE Ⅱ）。

3）钴带（Co Position）。γ-Fe_2O_3 磁粉外吸附或包裹一定量的 Co 离子或化合物或 C_0-γ-Fe_2O_3 粉层。它的高频灵敏度高，放音补偿时间为 70μs（普通带 120μs），信噪比和高频性能都有提高，而且缩弥补了 C_rO_2 带低频灵敏度低的缺点，价格便宜，对磁头磨损比 C_rO_2 带轻，有

取代铬带的趋势。

4）铁铬带（Fe-Cr Position）。γ-Fe_2O_3+CrO_2（1μm）。1982年被IEC规定为第三种类型的盒式带（TYPE Ⅲ），低频由γ-FeO_3决定，高频由CrO_2决定。

5）金属带或金属镀膜带（Metal Position）。用Fe、Ni、Co等金属粉末或镀膜，高频性能稳定，记录密度大，动态大，是目前最高质量的磁带。TDK的MA带，SONY的Matal Master带等是金属基带，是IEC的第四类盒式带（TYPE Ⅳ）。

各个厂家对磁带的命名是不同的，而且发展很快，名目繁多。

常用磁带的规格如下：

	品种	磁带厚（μm）	磁性层厚（μm）	带长（m）	带宽（mm）
开盘式	标准带	50	12	370	6.30±0.01
	长带	35	12	550	6.30±0.01
	加长带	25	8-12	740	6.30±0.01
盒式	c-30	20	6	45	3.81+0-0.05
	c-45	18	6（金属带4）	68	3.81+0-0.05
	c-60	18	6（金属带4）	90	3.81+0-0.05
	c-90	12	4	135	3.81+0-0.05
	c-120	9	3	180	3.81+0-0.05

带速都是1.5m/分。长带的片基及磁层都薄。

磁带上的磁迹可以是单磁迹，也可以是双磁迹。

录音带在实用上的主要的两个技术指标是频响特性和信噪化。标志磁带质量和性能的技术指标还有矫顽力（Hc）、剩磁通密度（Br）、工作偏磁、灵敏度、最大输出电平（MOL）等。

9.3.4 磁带录音机的传动机构

磁带录音机的传动要求是：能按固定的线速度运行磁带；速度变化小；磁带位置要稳定；快进、快退可靠，不损伤磁带。

传动方式可以用单电机、双电机或三电机。三电机是将主导、倒退、快进分开。双电机是主导与快进、快退分开。单电机多用于盒式录音机，传动复杂。

9.3.5 降噪（Noise Reduction）

噪声主要是磁带噪声，与磁性材料种类、粉粒大小、运转速度和频率高低有关。以中高频噪声为主。

降噪方法有以下几种：

1）噪声滤波器（NF）。把高频切掉，但把乐音的高频分量也一起丢了。

2）杜比降噪（Dolby）

人耳对噪声信号的感觉是，当信号大时，噪声不易被察觉。于是在大信号时正常录放音，而对中高音（500Hz）以上的小信号则提升10dB录音，图9.13（a），然后降低10dB放音，图

9.13（b），这样、噪音电平也下降了10dB。杜比B和杜比C则是频段划分不同及提升dB数不同。杜比技术还在不断发展，不断出现新的方式。

在使用杜比降噪系统时还要调整灵敏度。只有对用杜比录音的磁带才用相应的杜比放音。

3）动态噪声限制器（DNL）

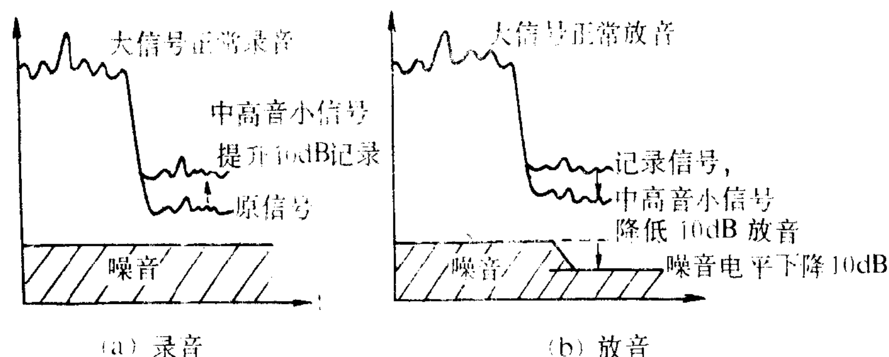


图9.13　杜比降噪原理

对人耳的听觉特性来说，与大的音乐信号相比，即使切掉小信号的高频部分，也感不到明显的音质变化。于是在放音时加上动态噪音限制器，切掉特别小信号的高音，从而使信噪比得到改善。

9.3.6　磁带录音机的主要技术指标

磁带录音机的主要规格和技术指标项目有：

1）带速。带速的偏差至少要求小于0.5%。

2）抖晃率。高级录音机抖晃率指标小于0.1%。

3）起动时间、停止时间、倒带时间。一般起动时间不大于0.5秒，停止时间不大于3秒，倒带时间不大于2.5分。

4）频率响应，或有效频率范围。

5）信噪比。一般家用录音机要求不小于50-60dB。

6）串音和通道隔离。

7）谐波失真率。

8）消音率。实用上要求至少55dB以上的消音率，高级的机器要求75dB。

9）通道/磁轨数。

10）磁头数。

11）电机类型。

12）输入灵敏度/阻抗、输出入电平等。

§9.4　电唱机（Turntable，Electric Gramophone）

自从1871年爱迪生（Edison，1847-1931）第一次录下了“玛丽有只小羊羔”以后，唱片、唱机就一直没有离开过音乐。1881年克莱门·阿代尔（Ader，1842-1926）用两组麦克风放在两边拾音，开了立体声的先驱。1925年有了立体声广播，1930年有了立体声唱片。1948年发

明了慢转密纹唱片，并不断改进，一直至今。

高级的音响重放用电唱机而不用磁带录放音机，因电唱机的频带宽，而磁带录音机到10kHz以上就没有了。现在，除了机械唱盘以外，激光唱盘已经普及。又推出了数字唱机。本节先介绍普通的机械唱盘电唱机。

9.4.1 电唱机的构成

电唱机一般由以下部件构成：

1）唱头座。安放唱头用，其形状、材料与放音质量关系很大。

2）唱头。即拾音头，是一个声一电换能器。

3）拾音臂。保持唱头有一定针压及使唱片平滑移动。

4）唱片盘。

5）闪频观测器。即示速器，显示转速是否稳定。

9.4.2 唱片（Records）的录音特性

唱片有两种录音方法：一种是等幅录音，即唱针运动的幅度不变。这样，随着频率的增高，唱针运动速度就必然加快。另一种是等速录音，即唱针的运动速度不变。也有的是把两种方法混用，低频用等幅录音，中、高频用等速录音。

9.4.3 唱头（Head）

唱头主要是个传声器，把机械振动变为电信号。按唱片录制的方式不同也分为速度比例式和位移比例式。速度比例式的输出信号与唱针沿声槽的动作速度成正比，位移比例式则与幅度成正比。

速度比例式的唱头有电磁式的，如可动磁铁型（MM）（VM）、感应磁铁型（LM）、动铁型（MI）及可变磁阻型（VR），也有电动式的如动圈型（MC），其中（MM）、（MC）是常用的。

位移比例式的唱头有压电式的，如压电晶体型，压电陶瓷型或集成电路型。也有电容式的，如光电晶体管型。压电晶体型是常用的。

现将最常用的几种唱头的使用性能列举于下：

	陶瓷型（晶体型）	MM型	MC型
频率特性（Hz）	50-15000	10-20000	10-20000以上
唱针的动作	硬	柔软	柔软
分离度	一般	好	好
均衡电路	不需要	需要	需要
耐湿性	强（晶体型较差）	强	强
耐热性	强（晶体型较差）	强	强
唱针更换	较易	容易	容易
针压	大	小	小
音色	较硬	丰满有力度	清澄
结构	简单	较复杂	复杂
输出	大	小	很小

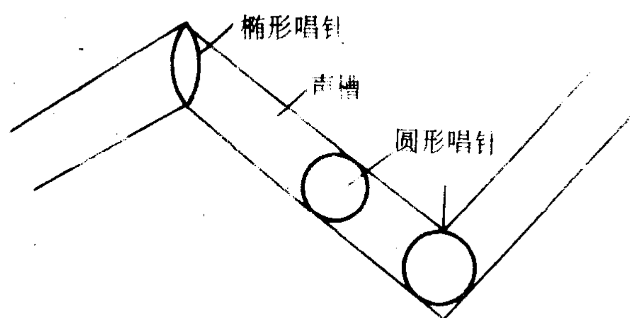


图 9-14　椭形唱针与圆形唱针的比较

由上可知，晶体型或陶瓷型的唱头是普及型的，便宜，简单，但音色较差。

唱头上还有唱针。电唱机的唱针是金刚石制作的。有的是整个部件式的，也有的是焊上一点的焊接式的。高级唱针的针尖是椭圆形的而不是圆形的。由图 9-14 可知，用圆形的针去放音，声槽有些部分没有填满，是会失真的，而椭形较好些

唱头通过唱头座连接到拾音器上，唱头座要求有一定的针压，约为 2g。如针压太轻或结构强度不够，唱头会发生自振动而产生共鸣。唱头座常压制成整体型，约重 7-8g 到 20g。唱头要紧固在唱头座上。

9.4.4　拾音臂

拾音臂用以支撑唱头座，并保护唱头在唱片上轻巧、灵活、平滑地运行。它有一个平衡锤，以保持针压不太大。要保证唱针的运动永远保持与唱片上的声槽平行，另外，还要注意克服旋转时的侧向力。拾音器的结构还要保持使唱机系统不产生共振。

拾音臂有直线形的（图 9-15（a））、J 形的（图 9-15（b））和 S 形的（图 9-15（c））。

由于唱头所受沿唱片滑槽方向的牵引力 F 可以分解为力 F_1 和 F_2，如图 9-16。其中

$$F_1 = F \cdot tg\theta \quad ,$$
$$F_2 = F/\cos\theta \quad .$$

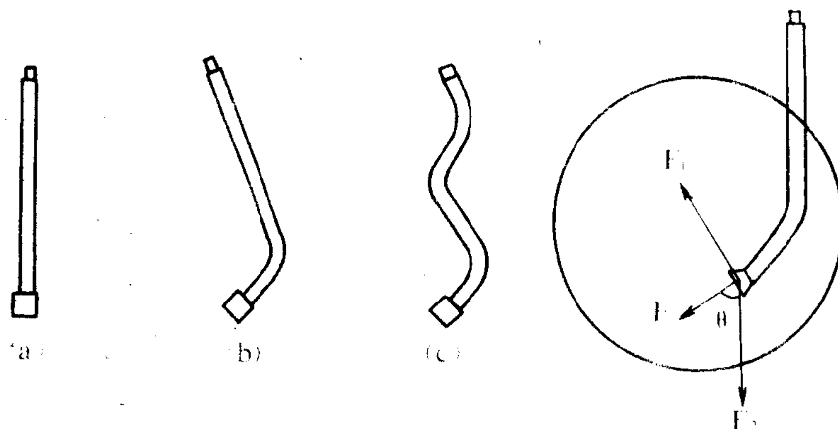


图 9-15　拾音臂　　　　图 9-16　唱头受的力

力 $\vec{F_1}$ 就可能由于外界某种振动或唱片倾斜等引发跳针现象。因此要设法通过各种途径来抵消 F_1 以减小跳针的可能。

9.4.5　电唱机的驱动装置

电唱机的驱动电机要求转速稳定，振动小，还要易变速。马达采用感应电机或同步电机，前者简单，便宜，但随外电压变化大；后者稳定，振动小，但价贵。

电机驱动的方式有三种。一种是直接驱动，电机转轴即是唱盘轴，适用于低速电机，如图9.17（a），这种驱动方式振动小。电机驱动方式还有边缘驱动（如图9.17（b））和皮带驱动（如图9-17（c））。图中A是唱盘，B是惰轮，M是马达，L是皮带。当前更先进的驱动采用同步转子系统，即与主马达同轴有一个副马达，产生与主马达的转矩相抵消的转矩，使马达转动时基本上不产生振动。

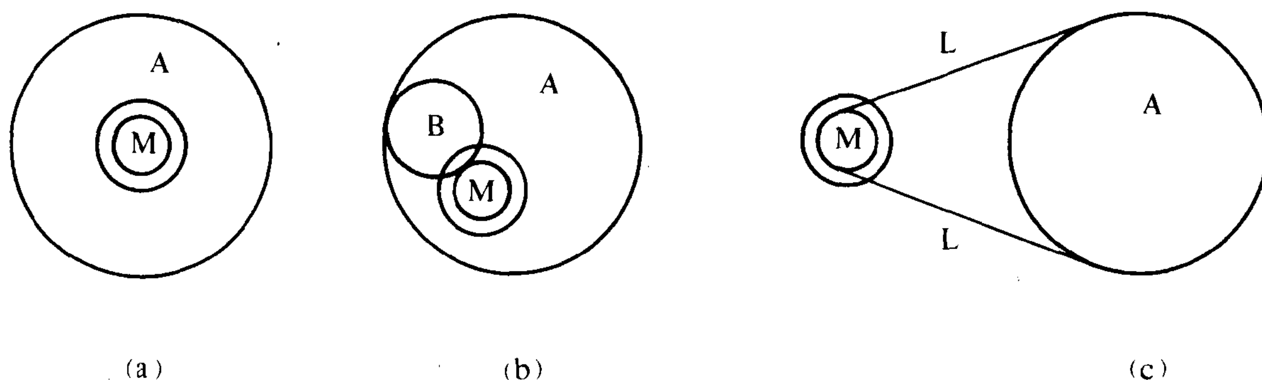


图9-17 电机驱动方式

9.4.6 电唱机和唱头的主要指术指标

电唱机和唱头的主要规格和技术指标项目有：

1）转速。现规定标准的有两种，即33.5转/分和45转/分。录放音的转速不一致会使音高失真。每相邻半音，频率差1.059倍，即100音分。如转速变化1%，音高会差16音分，是一般人可以察觉到的。低质唱盘的转速不匀或转速不准，会导致与有固定音高的乐器间配合不上。

2）抖晃。抖晃也会造成唱片放音速度变化。如果变化0.3%，则音高差5音分，0.1%是2音分。高质量的唱机要求达到不超过0.01%。

3）信噪比（S/N）。主要的噪声源有电机转动和交流声等。一般要求S/N不低于60-70dB。

4）频率特性。对唱头来说，在20Hz-20kHz的全频率段内保持均匀的频率响应一般是不成问题的，最低要求40Hz～12.5kHz。

5）串音。左右声道的相互泄漏叫串音。反之，相互分离叫隔音。人耳左右差15dB就认为完全隔离了。所以全频带隔离15-20dB就可以了。

6）唱头输出电压。对MM型是3-3.5mv，MC型是0.05-0.5mv。大输出电压对降低SN比有利。

7）针压。各厂出品的针压不定。以针压不损坏唱片为准。

8）拾音稳定性。这是要不跳针，特别是大音量时。要调整针压。

9）柔性和刚性。以dyne/cm表示柔性。

10）电机类型。

11）传动形式。

12）唱盘类型。

13）有效音臂长。

§ 9.5 激光唱盘（Compact Disc Player，CD Player）

9.5.1 激光唱盘的特点：

激光电视唱盘可以同时播放出图像和音响。小盘的激光唱片（CD）可以记录音乐或记录图像，它是数字采样记录，用激光代替唱针，因此它有许多特点：

1）寻索方便。不必像机械纹唱片那样从外到里寻索某处的内容，而可以用激光直接“跳跃”地寻找。

2）由于不用机械唱针，用激光照射而接收反射信号，可以采用浮动式驱动机构，所以避免了抖晃。

3）寿命长。不受灰尘或划伤的影响。因为激光唱盘用丙稀树脂（PMMA）复盖，信号面不暴露，理论上是不磨损的。

4）高密度记录。激光唱盘每一面（∅30cm)），可记录信号数量达140亿个，可排成54000列，记录一个多小时的活动图像或54000个静止图像。如果采用静止图像和伴音（SFA）方式，每张唱片可记录几千张静止图像和16小时音乐。专用激光音乐小唱盘的直径是10cm，可记录一个多小时。

5）采用数字录音，采样频率高，失真小。

6）采用数字录音，有高信噪比。

7）成本低。可以大量复制。

此外，如果作为图像表示，图像质量高。可以随时放映所的选定的静止图像。与计算机连机，可以作信息储存，可以作人机对话。

它的缺点是目前还不能像磁带那样多次录音，重复使用，而且由于数字录音制式的规定，频响不超过22kHz。这对于超高质量的音响是不够的。这两点现已开始解决。

9.5.2 激光唱片的结构和工作原理

激光唱片的基片上记有信号的面是信息面。信号面上镀有铝反射膜，外面再复以PMMA保护膜。

如图9.18，a是片基，b是凹凸的信号面，上面的铝反射膜，根据对激光反射的强弱读出信号，c是保护膜，d是光源及接收器。

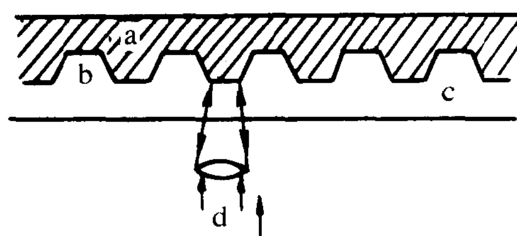


图9-18 激光唱片信号面

图9-19给出激光电视唱片的尺寸，符号同图9-18。激光从下面射入，一般使用波长λ=780mm或830mm的半导体激光，如SONY公司用的是MOCVD方法做成的AlGaAs系列的激光。

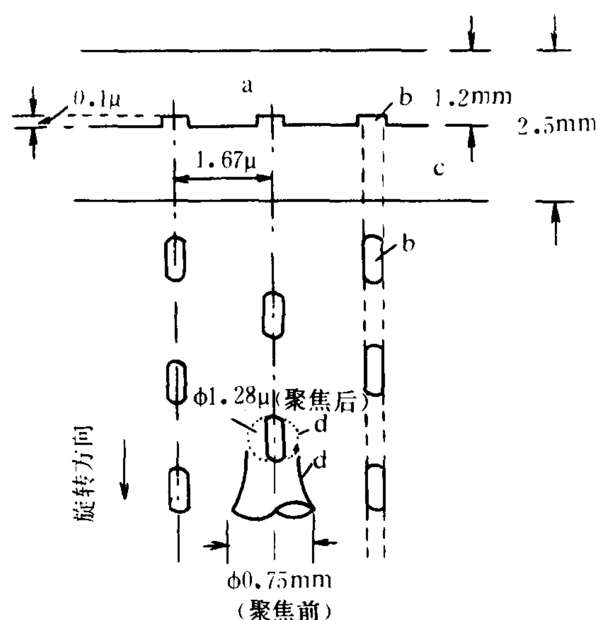


图 9-19 激光唱片的尺寸

9.5.3 激光唱盘的主要技术指标

激光唱盘的主要规格和技术指标项目如下：

1. 模式。数字还是模拟。
2. 激光器类别、光束数。
3. 通道数。是否立体声。
4. 译码器比特数。16Bit。
5. 频响。5-20kHz 范围内±0.5dB。
6. 信噪比。>100dB。
7. 动态范围。>95dB。
8、抖晃率。几乎不可察觉。
9. 负载阻抗的输出电压。
10. 总谐波失真。<0.0003%（1kHz）。

§9.6 调谐器（Tuner）

9.6.1 调谐器的功能

调谐器就是收音机。在以收听音乐为主的音响中的调谐器，一般主要是调频的（FM，Frequency Modulation），也有调幅的（AM Amplitude Modulation）。调频接收中还有立体声（Stereo）的；调幅接收中有中波（MW）波段的，但一般没有短波（SW）波段的，因为音响的接收灵敏度高，放大倍数大，这样，短波收音噪声太大。调频广播比调幅广播有信噪比高，失真小，抗干扰能力强，频率响应宽，动态范围广，可便于利用立体声等优点。

调谐器上常有许多标志，同时表示其功能，如：

FM——调频。

AM——调幅。

Auto——自动进行立体声调频与单声道的转接。

Mono——单声道。当信号弱时，立体声接收信噪比差，改用单声道可改善信噪比（S/N）。

REC LEVEL CHECK——录音电平校准。在对调频信号录音时用。

MUTE——静噪。

HI——BLEND——高频混合。左右声道的高频成分合成，提高信噪比。

FM 调谐器带有自动增益控制（AGC）、自动频率控制（AFC）等。

电台广播的音源的质量一般是没有问题的。接收部分除了本机的质量外，接收调频广播时天线的形状、方向和放置情况会相当大地影响接收效果。

9.6.2 调谐器的主要技术指标

调谐器的主要规格和技术指标项目如下：

1）调频（FM）和调幅（AM）的接收频率范围。

2）静态灵敏度（单声道和立体声）。

3）高保真要求最小信号输入电平。

4）总谐波失真。

5）频响，或通道不平衡度。

6）交变频道选择性。

7）立体声通道分离度。

8）信噪比。

9）抑制性能。

§9.7 控制放大器

9.7.1 电声调制（Audio Modulation）

从传声器、电唱机的唱盘、收音机的调谐器等来的电信号，要进行加工，包括功率增益，改善频率特性，降低噪声，或者再人为地加入一些效果，这些都在电声调制之列。有些电声控制的内容如降噪常常放在录放音座内。有些电声控制如功率放大、均衡器、人工混响、人工延时等，有时专门设计一个整机单元，但有时也包括在控制放大器（Control Amplifier）之内。

9.7.2 电声中的分贝

与前面第二章声学基础中所述的一样，用分贝来表示电压、电流、功率等电学量。相应于功率级，叫做

$$功率电平=10\lg\frac{W}{W_{ref}}\quad,$$

相应于声压级，叫做

$$电压电平=20\lg\frac{V}{V_{ref}}\quad,$$

$$\text{电流电平}=20\lg\frac{I_2}{I_1}\quad。$$

上述 W_{ref}常取 1mV，V_{ref}在 1KΩ 电路中常取 1v，在 600Ω 电路中常取 0.775V。

当电路电阻 $R_1=R_2$ 时，

$$10\lg\frac{W_2}{W_1}=10\lg\frac{V_2^2/R_2}{V_1^2/R_1}=10\lg\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2=20\lg\frac{V_2}{V_1}\quad,$$

$$10\lg\frac{W_2}{W_1}=10\lg\frac{I_2^2/R_2}{I_1^2/R_1}=10\lg\left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2=20\lg\frac{I_2}{I_1}\quad。$$

下面列出输出入电压比 V_2/V_1 与分贝数 dB 的对应值：

$\frac{V_2}{V_1}$	1	10	100	1000	$\sqrt{2}$	2	4	3.2
dB（$20\lg\frac{V_2}{V_1}$）	0	20	40	60	3	6	12	10

$\frac{V_2}{V_1}$是等比关系时，dB 是等差关系。

分贝在电声中应用得很多，如：

1）增益或衰减多少 dB；

2）信噪比的表示；

3）音调的调整范围。与 1kHz 比，调整了多少 dB；

4）低频滤波特性。与低频滤波截止频率相比，降低一个倍频程，衰减多少 dB（图 9.20）。

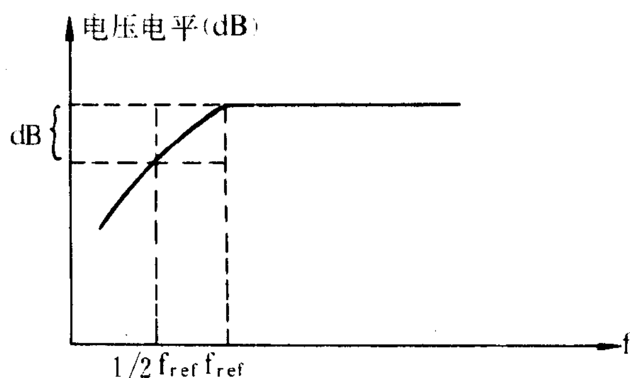


图 9-20　低频滤波特性

5）高频滤波特性。与高频滤波截止频率的比，高一个倍频程，衰减多少 dB（图 9.21）。

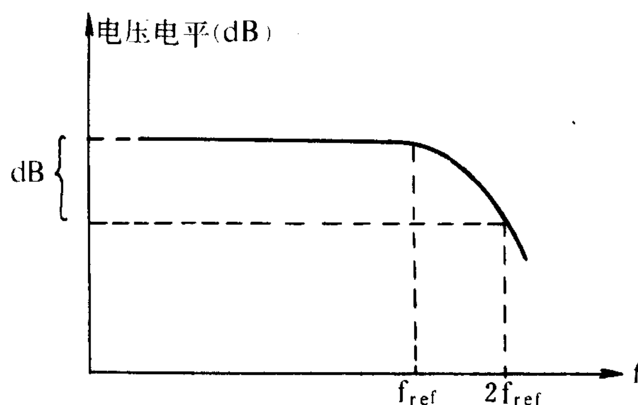


图 9-21　高频滤波特性

6）输出声压级。给扬声器 1W 信号，在轴向输出距离 1m 处的声压级，以 20μPa 为参考声压。

7）频率特性，在规定频率范围内允许有上下多少 dB 的浮动。

8）RIAA（美国信号工业协会）偏差，表示唱片放音均衡电路精确程度的一种方法，用 dB 表示。即。

与 1kHz 时相比，电压电平差多少？然后加以频率修正（图 9-22（a）、（b）），修正后的电平与标准的相比差多少，以 RIAA 偏差表示（图 9-22（c））。

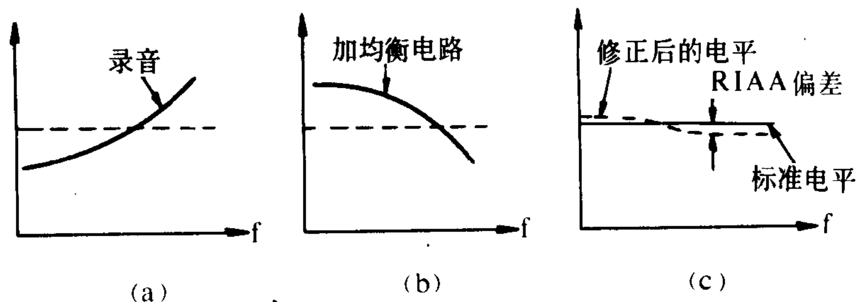


图 9-22 RIAA 偏差

9.7.3 控制放大器

控制放大器一般包括：

1）前置放大器或升压器。

2）均衡放大电路。

3）音调控制电路。

尽管放音系统有很平的频响特性，但是由于房间条件，扬声器的位置等，致使听感上有变化，要加以自动调整，可以按机内预置的标准调整，也可按使用者自己规定的标准调整。音调控制电路可以是负反馈式的，也可以是阻容式的。高级的音响是分段控制的。

4）滤波电路。

低频滤波，如滤掉唱片翘曲造成的低频声。高频滤波，如滤掉摩擦噪声和广播中的高频噪声。

5）响度控制电路。

这是使声音不要太响或太弱，特别在录音时进行自动控制。

6）唱头负载调整电路。

将由于唱头负载改变，致使频率特性改变调整过来的的电路。

7）静噪电路等

9.7.4 控制放大器的主要技术指标

控制放大器的主要规格和技术指标有以下一些项目：

1）输入灵敏度和阻抗。输入灵敏度为得到额定输出电压所要求的输入电压。

2）最大允许输入信号。指不失真输入。一般是 150mV。音乐电声一般要考虑 20 倍的动态范围。

3）输出电平。一般按 1V 电压输出。

4）最大输出电平。指不失真输出。

5）RIAA 偏差。一般是 0.3dB 或 0.1dB。

6）滤波特性。例如低频为-12dB/oct，高频为-6dB/oct。

7）音调控制特性。一般相对 1kHz，±10dB。

8）信噪比。一般 70dB。

§9.8　图示均衡器和人工混响、人工延时

在高质量的音响系统中，有单独成单元的图示均衡器（Graphical Equalizer）或均衡器（E-qualiger）。人工混响和人工延时也可以成为单独的单元。均衡器也可以附在控制放大器或录音卡座中，人工混响和人工延时也可以附在图示均衡器或其它单元里。

9.8.1　图示均衡器

图示均衡器与一般的音质调节器不同，它不是整体的调节，而是可以对狭窄频率范围进行调控，例如分为 5 个、7 个、10 个或更多个中心频率段，隔离其它频段，分别进行调节，以取得平滑的或选择“着色”的频率响应。

有的图示均衡器带频谱分析仪，可以随时作实时的动态显示，这当然也是半定量的，有很好的装饰作用和动态感。

立体声的音乐可以分左右频道分别调节均衡器。

可以任选通过或不通过均衡器进行放音或录音。

9.8.2　图示均衡器的主要技术指标

图示均衡器的主要技术指标项目如下：

1）输入灵敏度和输入阻抗（分别对于话筒、磁带、唱机、键盘乐器）

2）输出电平。

3）总谐波失真。

3）频率响应。

5）调节幅度。

6）中心频段数。

7）信噪比。

8）左右声道分离度。

9.8.3　人工延时（Artificial Delay）和人工混响（Arvificial Reverberation）

有些情况下，自然的反射声，包括前期反射声和混响声不足以满足音响要求，就要使用人工延时制造出前期反射声或混响声，有时在进行多声道近距离扬声时，也要用人工延时以避免声能太高。

有时要模拟一些特别的声响，如空的大厅里的声音效果、合唱效果、回声效果、声像滑移效果、有线广播效果（重叠音）等，也要用人工延时或人工混响。图 9-23 是使用人工延时和人工混响电路的示意图。

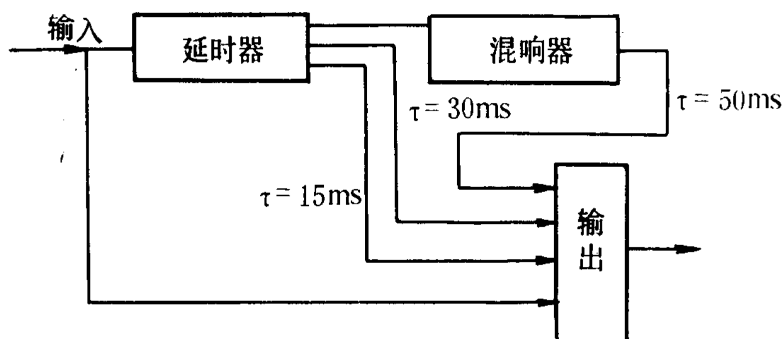


图 9-23 人工延时人工混响

下面列出一些人工混响设备。有的不是电声，但可作为比较：

混响系统	特点
立体声混响系统	有身临其境之感，体积小，难调整
磁混响器（磁带录放）	小而可携
电子（数字）混响器	可调控，价高
混响室系统	有罐子声，价高
钢板混响器	音质好，笨重，对使用条件要求高
金箔混响器	小巧，价高
弹簧混响器	音质尚好，便宜

§9.9 功率放大器

9.9.1 功率放大器（Power Ampl ifier）的作用及种类

整个音响系统必须有一定的功率放大才能达到一定的声强级，一般要达到 90dB 以上。在家庭里用，声强级为 80dB 左右听起来比较舒服。这样，扬声器有 1W 左右的电功率。为了考虑音乐信号强弱变化可能有 10-20dB 的幅度，留有 20 倍的余地就可以了。

一套音响系统，如果有了很好的音源，很好的控制电路，功放的好坏是对整体音响效果的一个很关键的因素。因为不管是什么源，几乎所有的音乐都要通过它传播并放大，最后由喇叭放出。因为它是大功率的，所以要保真就比较费力气。

功率放大器按其工作原理分为几类：

A 类：空载电流大，失真小，利用 85%功率。

B 类：空载电流小，效率高，利用 80%功率。

E 类：推挽放大。

电子管放大器有独特的音色。

功率放大还有无输出变压器电路（OTL），无电容器输出电路（OCL），桥接无输出变压

器电路（BTL）等。

功率放大器需要有保护电路。其中有扬声系统的中点电压变动时对扬声器的保护；有防止功率晶体管超负荷的保护；有温度异常对晶体管的保护以及由开关通断时有冲击噪声，要对扬声器进行保护等。

9.9.2 功率放大器的主要技术指标

功率放大器的主要规格和技术指标有以下项目：

1）每一通道的额定输出功率。一般的家用音响有 10-20W 就可以了。这里已经考虑了峰值功率约为平均功率的 10～20 倍。

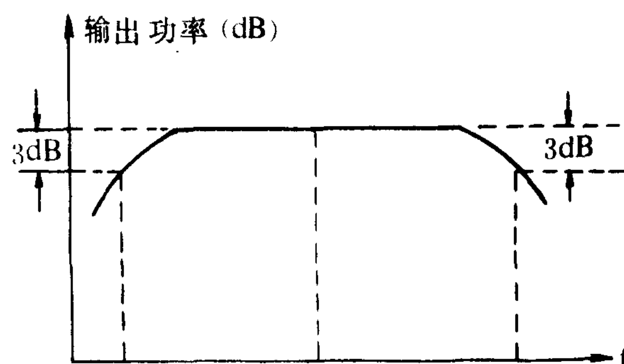


图 9-24 输出功率频带范围

2）动态功率。即用于放送音乐信号时的功率，要比额定功率高 10%-30%。例如额定功率为 75W 时，动态功率为 100W。

3）峰值音乐功率。(Peak Musical Power）有时用这表示动态功率。

4）输出功率频带范围。即与中频相比，输出的高低频功率下降 1/2（-3dB）之间的频带（图 9-24)，与频率有关。

5）负载阻抗。

6）高次谐波失真率。这与输出功率有关，在额定输出功率及 1/2 额定输出功率时测定。如图 9-25 是在 20kHz、50W 下测定的。a 是输出波形，b 是失真成分，失真率为 0.015%。

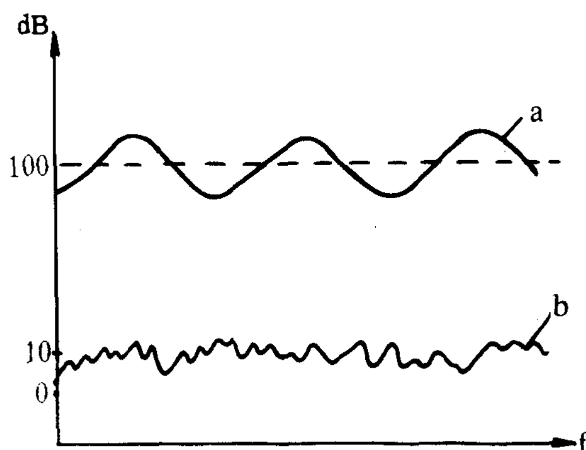


图 9-25 高次谐波失真曲线

7）调制失真率。即互调失真率。不同频率的信号同时输入功率放大器时有相互影响而出现失真。音乐信号总是多频率 的，调制失真也总会出现。

8、阻尼系数（D・F）

$$D \cdot F = \frac{\text{扬声器阻抗}}{\text{放大器的输出阻抗}}$$

D·F＝10～100 较合适。扬声器引线长、细，会使 D. F 降低而导致音质下降。

9）输入灵敏度。即得到额定输出功率所需的输入信号的大小，要与控制放大器匹配。

10）信噪比（S/N）。高质量的功率放大器要求 S/N＞100dB。

§9.10 扬声器系统

9.10.1 扬声器系统的构成和作用

扬声器（Loud speaker）系统包括换能器、耦合体以及控制电路。

换能器包括电动元件和喇叭，把电能再转换为声能。耦合体即音箱，可以使适当频率的声音被加强或被抑止。控制电路是在音箱上或整机中专为控制放声质量用的，常包括阻抗匹配和分频电路。分频可以是利用阻容分频，区分高、低音输出；也可以是电子分频。分频可以放在功放级之前，即分频道放大，也可放在功放级之后。

9.10.2 电—声换能器

电声换能器是传声器的逆运行。其工作原理同传声器一样，不过反其道而行之罢了，也有动圈式、带式、压电式等。还有一种静电扬声器，振膜整个涂在薄塑料表面，其两侧有可透声的固定电极，改变极化电位使带电振膜振动。还有离子扬声器等。

扬声器要用喇叭。纸盒和球顶形的喇叭适用于放中高频。号筒式的喇叭适用于高频。

常用的动圈式扬声器及喇叭如图 9-26 所示。喇叭用纸盒的材料可以是毛毡纸或多孔聚苯乙烯，适用于中低频（30Hz～15kHz)。图 9-26 中 a 是永磁铁，b 是动圈，c 是纸盆支架，d 是纸盆。要注意避免剌叭的极座效应即与其它构件的共振，也要避免边缘衍射效应即扬声器与音箱的边缘、孔、缝隙造成声波的弯曲而重新辐射。还要特别注意不要超过功率而烧毁线圈。

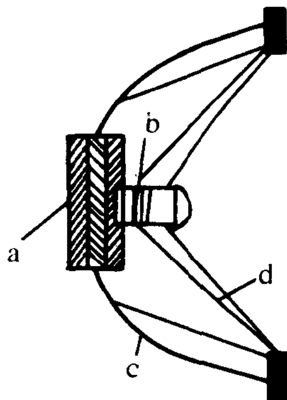


图 9-26 动圈式扬声器

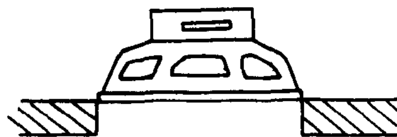


图 9-27 障板式音箱

9.10.3 音箱（Loudspeaker Cabinet，Loudspeaker Housing）

音箱是一个声耦合器，可以改善喇叭放音的音质。而且，喇叭振膜的前方把空气压缩，后

方则空气稀疏，在汇合处会发生干涉，必须把它们隔开。常见的音箱有以下几个基本类型：

1）障板式。如图 9-27。理想的障板要无限大，把前后声音区分开，实际上当然不可能。理论上要求其线度要大于重放音的波长 λ（100Hz 时 λ=3.4m），达到这点也不可能。总之，音板越大则低音效果越好。

2）背开式。如图 9-28（a）。其低频效果好于封闭式的，见图 9-28（b）。

3）封闭式。这是最通用的一种，声只从前膜射出。体积小，但效率低。如图 9-29。

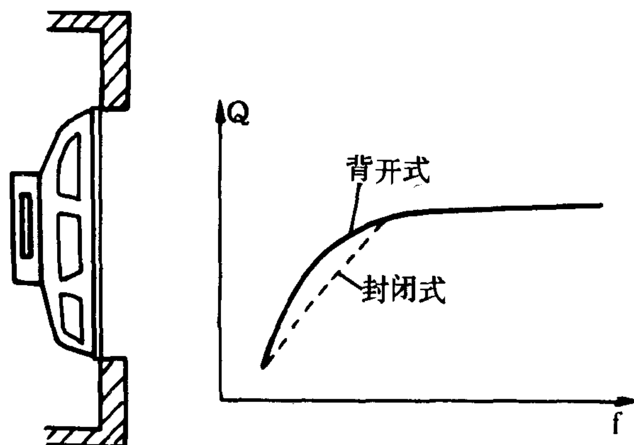


图 9-28 背开式音箱

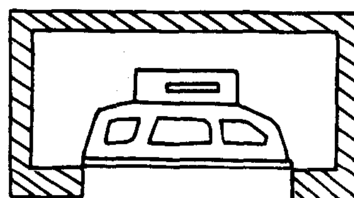


图 9-29 封闭式音箱

4）开窗式，即倒相式。如图 9-30，（a）为开孔式，（b）以振膜代替窗，这是一个亥姆霍兹振子。开窗式的频响也优于封闭式的，如图 9-30（c），而且效率高。

音箱也有指向性，如果重放声的波长 λ<<d，d 是振膜口径，则有均匀指向。但实际上对于低频是不行的（30Hz，λ=10m）。对高频是可以的（2000Hz，λ=1.7cm）。减小振膜尺寸可以增强指向性，但效率变低了。

当前，音箱的设计越来越讲究，如分格式、组合式、为超重低音设计的等等。

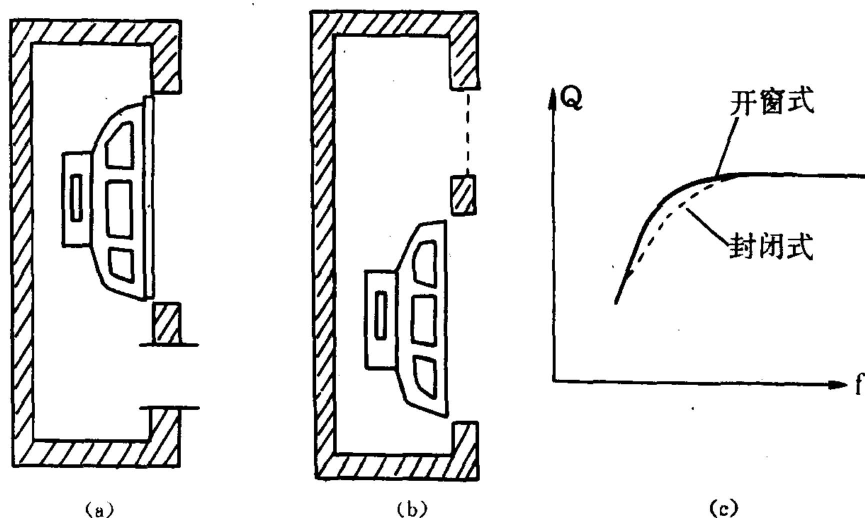


图 9-30 倒相式音箱

9.10.4 音箱放置位置与室内声效果

开窗式音箱放在墙角边上较好。从角、边上看去好像是号筒的延伸。房间有共振频率，一般在角边上有最大值，图 9-31 (a) 是音箱放的位置，(b) 是相应的频响曲线。在角上，低频的混响也好。如果音箱放在屋中间距墙一定距离，低频也可以抑制一些。把音箱吊挂起来一般不是好方法，因为这会造成声音传播途径的混乱，也不好利用墙壁的反射等。

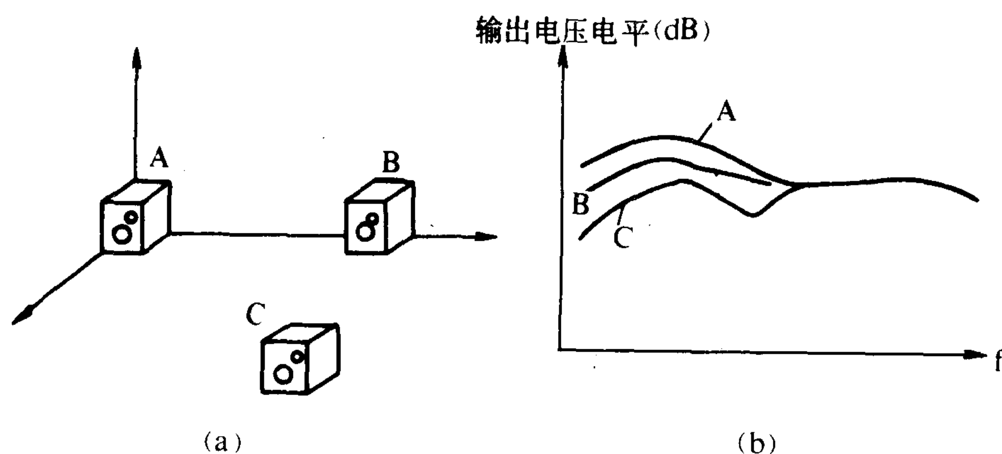


图 9-31　音箱放置位置与频响

背开式音箱不能放在角、边上，因为这样就把原来应该从背面射出的声音堵住了。

对立体声，两个或多个音箱要分开，至少要有 1.5m 以上，不然就听不出立体声效果，以在两个音箱中间等距处的立体声效果为好，最好是听音者处与两个音箱组成的等边三角形的顶上。图 9-32 (a) - (d) 提供一种在小房间里沿纵向或横向布置音箱的参考布局，图 9-33 则是一种“虚声法”的布置，把音箱面壁而放，产生虚的声像，这样，效果上就扩大了室内空间。

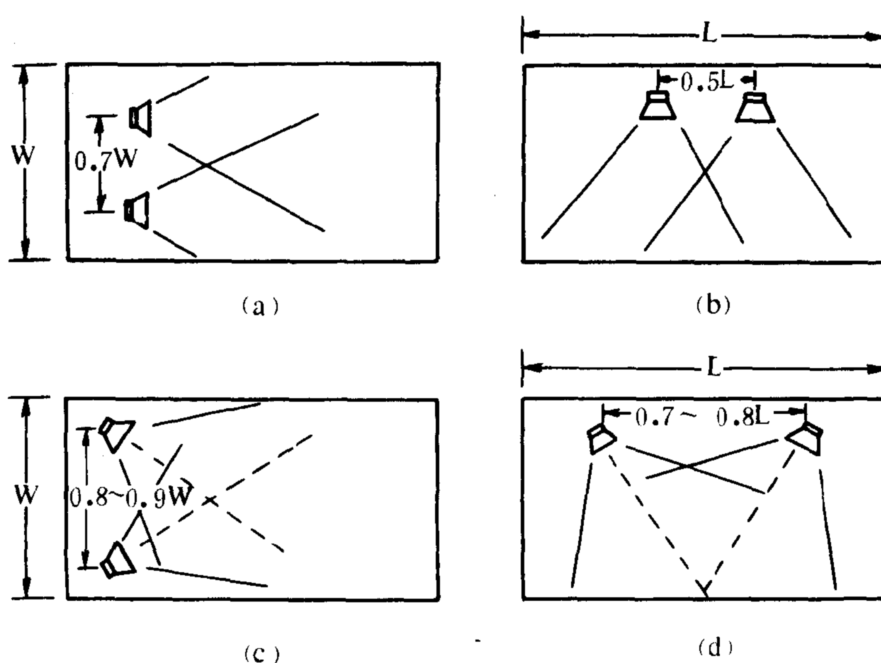


图 9-32　室内音箱布置

音箱放在什么东西上也影响声音效果。物体、地板都可能引起共振，为避免起见，音箱可放在轻泡沫硬塑料板上。如果音箱放在松散的地毯上，则振动会被吸收。

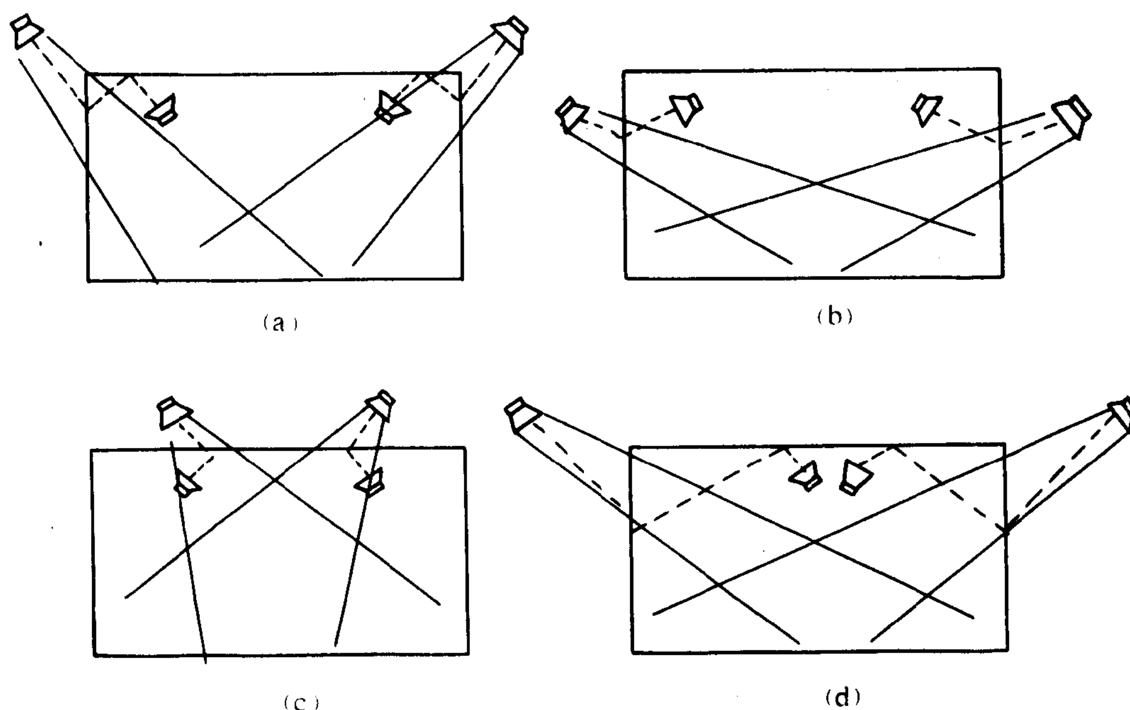


图 9-33 虚声法示意图

最后还要实际放置，进行调整试验，以主观评定为准。

9.10.5 扬声器系统的主要技术指标

扬声器系统主要电声技术指标和规格有以下项目：

1) 频率特性。

2) 输出声压级。电功率 1W，距 1m 远处，要求达到 90-93dB 声压级。也有要求距 2～3m 处达到 80～85dB 的。动态输出可能高 5～10 倍，要能做到不失真。

3) 箱体形式，容积。一般箱体容积差 2-3 倍，对音质不会有多大影响。

4) 额定输入功率。在这功率下工作不过热。瞬时过程可以超越 1.5～2 倍。

5) 最大输入功率。

6) 失真率。各频率下的失真曲线如图 9-34。例如每差 40dB，失真率 1%。

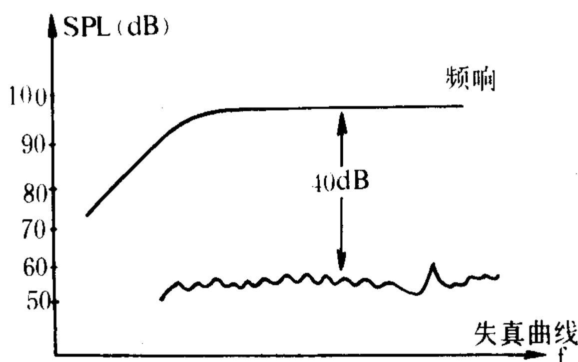


图 9-34 扬声器的失真率

7) 交叉频率的频响。

8) 阻抗。

9) 指向性。

§9.11 耳机（Earphone）

9.11.1 耳机的性能和种类

耳机实际上是一个小小的扬声器，其作用和功能与扬声器完全一样，然而它又有其独特的优点：

1）利用直接贴在耳朵上以及头部的整体共鸣作用，可以听到更好的频响效果；

2）可以容易而充分的体现出双耳立体声效应；

3）避免干扰；

4）轻便；

5）价格便宜。

耳机所能听到的音质效果并不次于一个大型的高质量的的扬声器系统所播放出的音质，所以普及使用耳机的前途很大。

耳机按其工作原理也可分动圈式的和电容式的等，以电容式的音质为更好。

耳机按其头戴使用方式可分全封闭式、开放式的和半开放式的几种。要指出的一点是即使耳机把耳朵掩得严严实实，纹丝不漏，外界的声音也不可能完全隔绝，因为头颅还会传声。

9.11.2 耳机的主要技术指标

耳机的主要规格和技术指标项目如下：

1. 频率范围。
2. 频率响应。
3. 双通道耳机的两个耳机的频响差。
4. 特性总谐波失真。
5. 特性电压。
6. 净电动势为零时的噪声。
7. 阻抗。
8、最大噪声电压。
9. 夹环夹力。

§9.12 立体声

我们曾在第四章中从双耳效应的角度讲过立体声，现在再来作进一步的说明。由于立体声作为从录音、贮存到放音是一整个体系，而且立体声技术在音乐电声方面是一个突破性的进展，所以单用一节来讨论。

9.12.1 立体声正弦定律

我们已经讲过，立体声是利用从声源发出的声到达两耳有时间差和强度差，即双耳效应而实现的，它是一个物理、生理、心理的综合效果。

如果人为的在人耳中产生一个声音的时间差或强度差，就好像空间有一个点在发声，这个点叫声像。用左右两个扬声器 L 和 R 输出信号，如图 9-35。可以用强度差，可以用时间差，也可以两者兼用，实际上强度差用得多。I 为声像。有两路立体声正弦定律：

$$\sin\theta_I = -\frac{U_L - U_R}{U_L + U_R} \cdot \sin\theta r \quad ,$$

式中 U_L、U_R 分别为左右声道的声强，θ_I 以顺时针方向为正。上式表明，当 $U_L > U_R$ 时，声像偏左。上式在高频下还要乘一个系数。

9.12.2 双道立体声拾音方式

双道立体声拾音方式有多种。有 X-Y 制，以正交重叠放置两个 8 字型指向传声器拾音，如图 9-36（a），这是强度型的。也可以用心型拾音器，有 M-S 制，正交放置两个拾音器，中间正前向是全向型式心型的，侧边是 8 字型的，如图 9-36（b）。还有 A-B 制，并排放置两个心型传声器，如图 9-36（c），既是强度差，又是时间差。还有拟人头制，如图 9-36（d），多传声器制等。

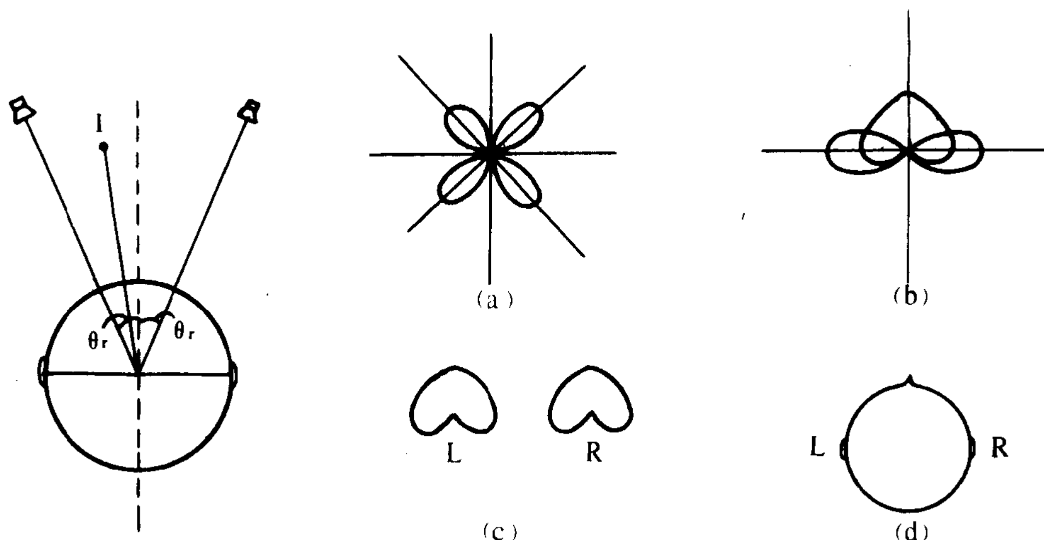


图 9-35 音像　　**图 9-36　几种立体声录音制式**

9.12.3 立体声放音

双道立体声用两个扬声器放音。四道立体声用四个拾音器录音，四个扬声器放音。环绕立体声用多个拾音器录音和多个扬声器放音。人工头录音的则用立体声耳机放音，总之是怎么录就怎么放。

立体声放声的优点是：

1）有临场感和空间感。单通道放声固定的来自一个声源，好像从一个钥匙孔里听音乐，不真实，死板，立体声避免了这个缺点。

2）可以减轻掩蔽。如四重唱，从一个点发出来，相应掩蔽的作用大，而分散在两个或多个声道放音，则听起来层次格外清楚。

3）可以分散噪声。

4）可以人为作出声像移动的效果。

用立体声耳机放音，除了一般耳机的特点外，更有交叉干扰影响少，瞬态效果好的优点。

9.12.4 假立体声（Quasi-Stereo）

假立体声也叫准立体声，伪立体声，仿真立体声，模拟立体声等，是用电学和声学的方法，把单声道的信号利用声强差、时间差或相位差，使人产生幻觉似乎有立体声的感觉。例如：

1）把扬声器面对墙角放置，于是低音绕过来，与高音反射过来有差别，产生立体感。

2）根据乐队中乐器不同安放扬声器位置，使声音有先后时间差，产后立体感。

3）利用两个扬声器放音，人为制造相位差，产生立体感，等等。

假立体声比较生硬，有做作感，而且容易有声像漂移。

§9.13 高保真

高保真（High Fidelity，Hi-Fi）-“Hi-Fi”是从五十年代研究发展密纹唱片，改善其性能使频响加宽，失真变小，噪音降低，音质优美，有身临其境之感而来的。真实与改进音质，一直作为音乐电声系统改进的主要方向而被重视及研究。

9.13.1 导致电声系统放声效果失真的缘由

几乎每一个环节都可能造成电声系统最后放声效果的失真，但可以归结为以下几个方面：

1）音源。包括唱片、磁带本身的质量，本底噪声，放音过程中的磁头、唱针带来的噪声，传声器或录音座、唱机与调制系统的匹配问题，以及现时拾音环境的噪声等。

2）通过系统。最容易出问题的是电声系统中各个部分的失真和频率响应问题以及工作点不当和人为的偏调。

3）放声系统和放声条件。包括放声系统与前级调控系统的匹配，放声系统的工作点、放声环境、环境噪声等。

9.13.2 高保真的含义

广义的说，高保真是声音通过录音重放，还要高度保持原来声源的特性；狭义的讲，高保真是指从电声系统的音源（包括磁带、唱片等）开始重放中的保真。具体说来有以下几个条件：

1）重放声在各频段上的成分与原来声相符。

2）无噪声从中加入。

3）重放声的响度和动态区与原声可比。

4）重现原声的空间特性。

5）完全保存有原声的空间混响特性和时间混响特性。

以上这些实际上是不可能完全满足的。其中主要的是第1、2项。4、5项要用立体声来实现。要实现高保真，除了设备的条件以外，还有技术和经验在内。

是否真正全部还原才是最好的效果，也是个可讨论的问题。一种意见认为，要完完全全

复原原来的声音才是高保真的原意；也有一种意见认为，高保真的目的是为了使人有更好的听感，因此，应该可以人为的加工，去除一些不好的声息，还可以对声音作一定的修饰。而且，完全没有背景噪声，也会有死板感，没有活力。

关于高保真，也有一些技术指标。静态指标有以下项目：

1）频响。一定频率范围内允许的响频曲线不平直度。

2）谐波失真。重放时谐波的变化。

3）互调失真。即非线性失真，高低频混合后新的频率出现。

4）相位失真。通过放音设备后不同频率的相移不同。

5）信噪比。

动态指标有：

1）瞬态失真。方波信号波形保持的能力。

2）瞬态互调失真。方波与正弦波的互调导致的失真。

根据保真度不同有不同指标。

§9.14 电子乐器（Eletronic Musical Instrument）

9.14.1 电子乐器与电声乐器

电子乐器与电声乐器不要混为一谈。用传统的乐器发声，然后用电声放大的是电声乐器，如电吉他、电扬琴、电子手风琴等。电子乐器是由电子振荡器产生声的，如电子琴，电子钢琴等。数字式电子音响合成器也是电子乐器。可以说电子琴是一种有固定音色的合成器，而合成器则是可以自由改变或制造出音色的电子琴。

9.14.2 电子乐器的性能和特点

现将电子乐器与传统乐器作一比较，说明它的性能和特点。

1）发声机制不同。电子琴是电振荡发声。

2）音准。电子乐器音高有的（如用石英振荡器定标的）可以非常准而且不变。但音准太准了而且不能变化则反而没有活力。劣质电子琴的振荡电路发声很不准，不能作为乐器。

3）音色。电子振荡器可出正弦波、方波、锯齿波、三角波、锯齿脉冲、非对称脉冲等波形，组合成各种各样的音色非常丰富，但很难完全模仿传统乐器的频谱，总是有“电味”。其实，“电味”也不一定是不好。

4）音量。电子乐器通过扬声器系统可以增大到很大音量。

5）音域。电子乐器的音域几乎可以是任意的，但一般不大于5组（5个八度）。因为人耳听觉的音高在高、低频段并不与频率一致，所以61键的电子琴到高音段听起来已明显偏低，虽然八度的倍频程是绝对准确的。

6）音量控制和力度变化。传统乐器的音量可随演奏力量而变，电子乐器的演奏力度与音量无关，电子钢琴得到了部分改善。且用脚踏板实现的音量控制总不如传统乐器的感觉，因为缺乏活力和表现力。

7）音色和感情的变化。乐器演奏应是一种感情的抒发和交融，而电子乐器的演奏是刻板

的，常常只是一种技术操作，所以感情的表现力就差。

8）伴奏方法。电子乐器有很多种伴奏方法，最普通的有自动节奏伴奏，自动和弦伴奏，分解和弦伴奏，低音伴奏，手动和弦伴奏等，对于初学者来说，简单、方便。

9）电子琴还可以实现多声部的演奏，有多层键盘，脚踏键等。

传统乐器与电子乐器都将存在和发展，相互不会取代。

9.14.3 电子琴（Eoectronic Keyboard）的基本结构

电子琴的基本结构框图如下（图 9-37）：

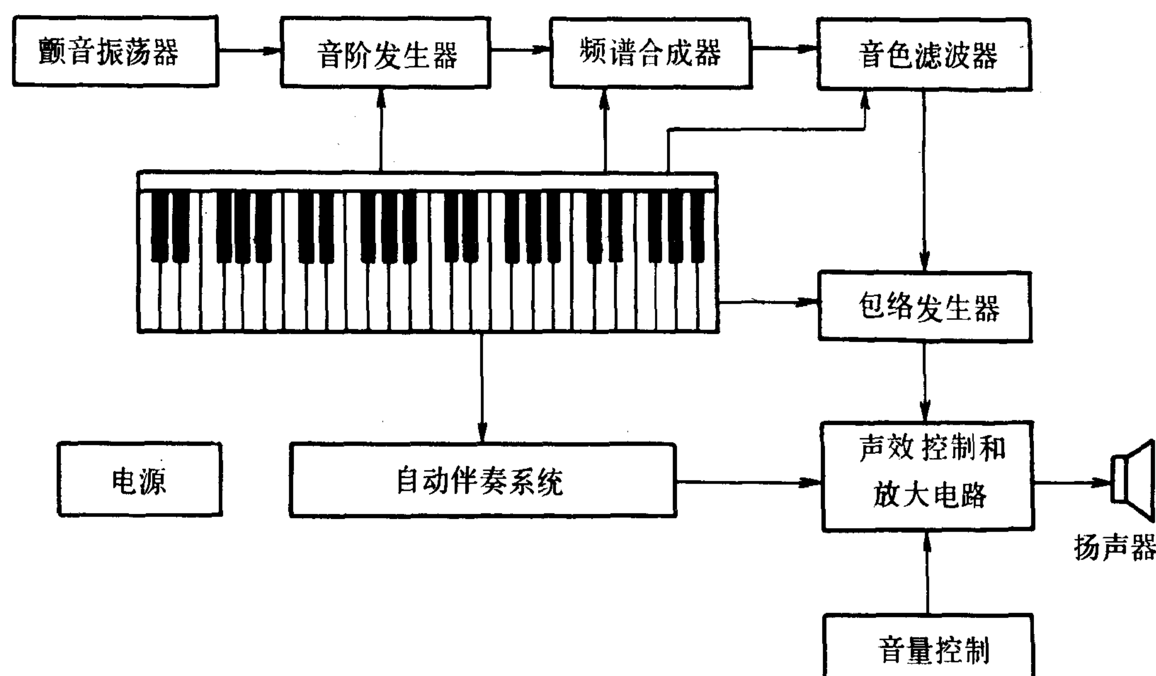


图 9-37 电子琴的基声结构框图

音阶发生器是一个可变的电子音频振荡器，对音准及稳定度均有一定要求。频率稳定度应不低于 2-8 音分，这里包括振荡器和分频器。现在都已经利用多功能的集成块即音源片，把各种功能都集中在一块音源片上。音源片的质量决定电子琴声音的质量。

颤音发生器可以有调频颤音和调幅颤音，还可以有延时等作用。音色的形成是用频谱合成器和音色滤波器，还可以有多种合成方法，如正弦波群合成，多点波列迭加，脉冲衰变控制和数字合成等方法。包络发生器可模仿各种音形，如吹、拉、弹、拨等。音量控制可以用电位器式、光敏电阻式或无级变压器式等。有的电子琴还可以有特殊的声音效果和功能，如记忆、编辑节奏、模仿一些自然声等。

当前，高档的电子琴可以有近百种音色及打击乐器声选择，几十种节奏选择，多种伴奏方式及和声选择，可以移十二个调，有力度功能，有同时发出双重音色及音色分离（一个键盘上分两种音色）功能，有条放编辑功能，有音量和束度控制，有延音踏瓣，可接外部功放，同时有 28 个音发声，基至有效果器及 MIDI 接口，可以在 MIDI 系统（见节十章）中应用了。

§9.15 家庭组合音响系统

9.15.1 家庭组合音响系统的构成和音乐功能

音乐电声已经普及到每个家庭。一套高质量的家用组合音响系统可以由多个部件构成。参看图 9-38。

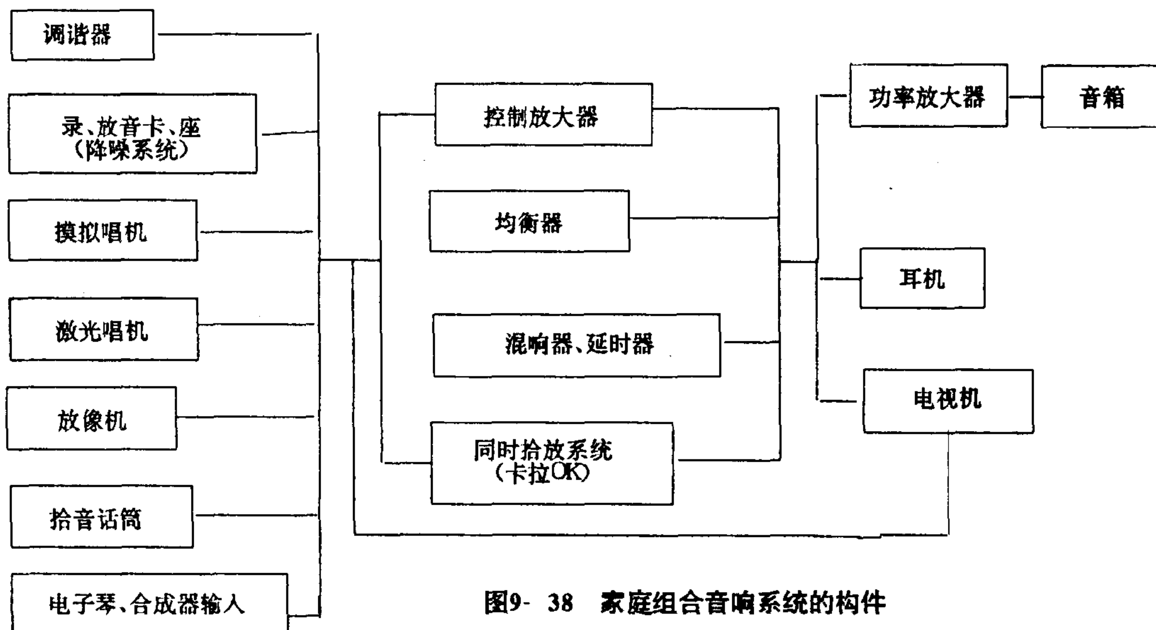


图9-38 家庭组合音响系统的构件

从以上组合的内容上已经可以看到，它既可以接收无线电广播，又可以用于录放各种唱片、录音磁带、录像带，还可以连接电子琴、合成器或作“卡拉 OK”机，也可以使电视或激光视盘的伴音通过主机听到高质量的伴音，总之要充分利用这个系统的功能，使家庭里一切音乐声响都提高到这套音响系统的水平上。一些单元部件一时配置不齐还可以逐步添购，还应有计算机接口，以扩展计算机的音乐功能。因此，选择主机的质量和功能，特别是有多种可以扩展功能的的接口，是必须注意的。

目前已有一种高密度视盘（VHD：Vedio High-density Disc），激光视盘（VD Vedio Disc），数码录音机（DAT Digital Audio Tape）等，有的开始进入一般家庭。

9.15.2 家用组合音响系统的综合功能

作为一种高级的家用工业产品，除了实用、经济以外，还要求外形美观，使用起来舒适，和有启迪性。

1）美观。

一套高级的组合音响，应该还是一件可供观赏的艺术化的技术产品。这要求：

造型美观、大方，有整体感；色泽庄重，不过分花哨；质感舒服、柔和；面板布置匀称，有均衡感；指示灯色泽明快，不落俗套。

除了静态美以外，还要有动态美。当各个部件工作时，随着音乐声的有无和强弱，均衡

器上的彩色指示屏或图示频谱分析仪的各种显示，录放音座、功率放大器上的电平指示灯光和音量旋钮不断跳跃、变化，特别是当夜幕降临时，在黑暗的环境里一边聆听音乐，一面欣赏闪烁跳动的指示灯光，更可以把你带入醉人的境地，充分地体味音乐的美。

2）舒适。

一套高级的家用组合音响系统，要求使用起来很舒适，这就要：

a. 有无线遥控功能。即启动，止动，暂停，音量的高低，各个机组单元的收、录和放，进带，倒带，选台，选节目段等要能够遥控；而且各机组之间的转换也能实现全遥控，即可随意选择启动调谐器，录放音座，唱机或激光唱机等，或任意遥控实现对各种音源的录音等。

高级的遥控是与手动同步的，即遥控音量大小的同时，音量控制旋钮也通过机械杠杆系统同步旋转，与手动完全一样。

b. 有尽量多的预置、自动和便利使用的功能。如各种显示指示；预定选择电台和激光唱片的节目段；预置关机时间；自动切换单声道与立体声；录放音座的自动回转轮流放音，或停或回转可以任选，且当两个卡座中有一个有磁带时，自动回转一个，当两个卡座中都有磁带时，又会自动回转两个；录音带与母带之间自动不间断的连接；录音带只回转一次，避免重录；有快速录音系统；模拟唱盘的自动下针，自动停机，自动返回；在运行过程中打不开录音带卡盒的保护功能；其他自动保护功能等。

3）一套组合音响也是一个音乐电声实验室。

一套高级的家用组合音响系统除了带给你音乐上的享受，使你增长对音乐电声和先进技术的了解以及一些工业设计的知识以外，还可以作为一件实验仪器，一个音响实验室。你可以：

a. 调节音量控制旋钮、左右声道分配、声高控制等旋钮，听声强的变化、失真、高低音配比、左右声道配比等实际效果。

b. 收听调频和调幅的电台广播，比较其音质和音色，特别可以收听不同电台的同一套广播进行比较。

c. 改变调谐器接收天线的分布、位置，试听其效果；

d. 试听通过或不通过均衡器音色的变化；

e. 调节均衡器，测听某一个频段“缺”了或“多”了的声音效果和音色的改变；

f. 调节音量控制旋钮，试听噪声在什么时候开始增大成为可感觉的，什么时候成为不可感觉的；

g. 利用均衡器，抑制某一频段的噪声，了解这种噪声的频段；

h. 试听使用和不使用杜比的录音和放音效果，进行对比；

i. 在录音时使用不同电平，听其录音效果；

j. 用不同质量的话筒录音或唱歌，判断话筒质量的影响；

k. 有没有人工混响、人工延时或程度不同的听音效果；

l. 耳机和扬声器音质及效果的区别，各种耳机的试验；

m. 单声道与双声道的试听效果区别；

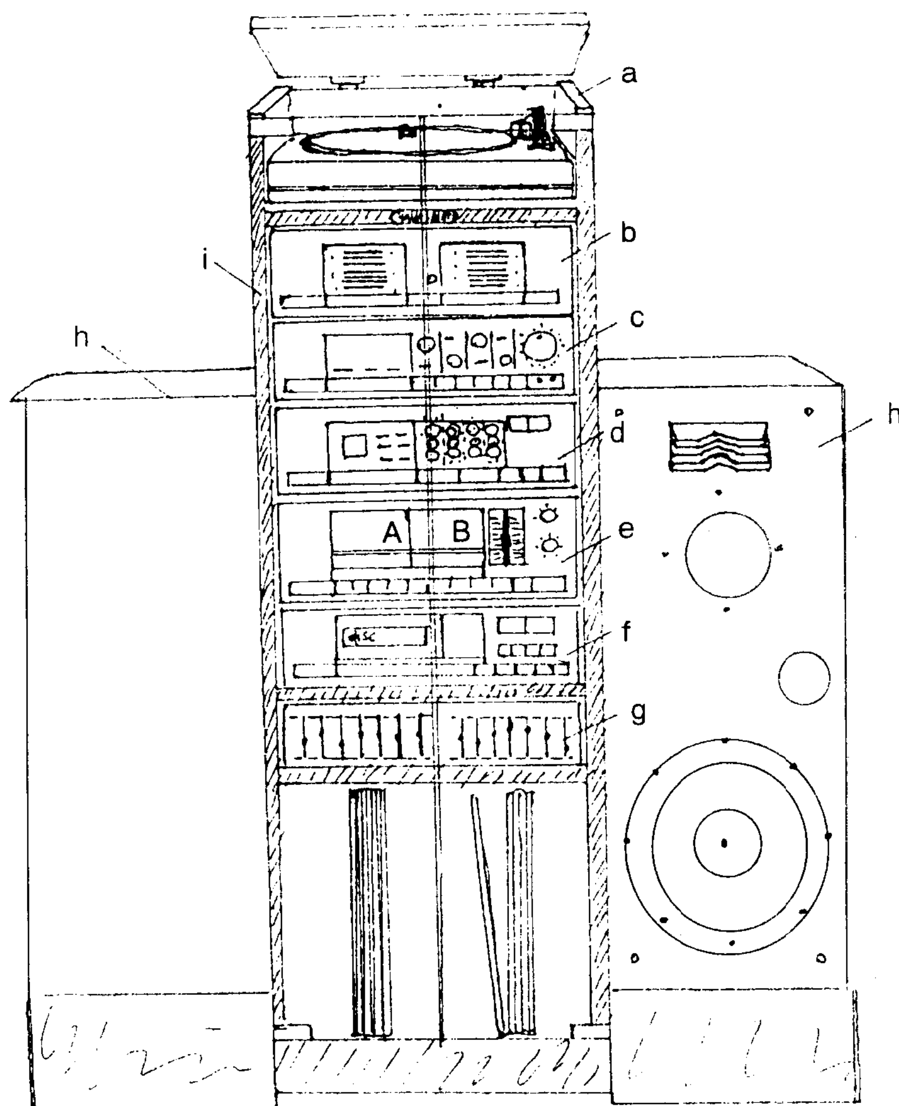
n. 总之，凡是可以调动的旋钮，都可以试听其调节效果。不仅是调节一个，还有一个互调的问题，即看同时调动两个或两个以上的效果；

o. 弄清楚你的音响系统所有部件的技术指标以及所有旋钮的功能，并进行试操作，这一

点本来应该在安装好系统之后就进行的，但实际上极少有人能做到这一点。

p. 用音响系统播放试听带，如电声产品节目源、立体声试听带、人工混响和延时效果试听带等，一边是学习，一边也是测试你这一套机器的质量，也可以把你的音响与收录机、别的音响作比较。

图 9-39 是一套高级的山水（Sansue）D-3000WR 型组合音响的表观图。a 为电唱机，b 为功率放大器，c 为控制放大器，d 为调谐器，e 为录音座，f 为激光唱机，g 为均衡器，h 为音箱，i 为机箱。



a. 电唱机　b. 功率放大器　c. 控制放大器　d. 调谐器（收音机）　e. 录放音卡座
f. 激光唱机　g. 图示均衡器　h. 音箱　i. 机箱

图 9-39　山水 D-3000WR 组合音响

4）启迪

a. 在音乐电声技术知识方面的启迪。每一种先进技术，实现它的物理思想、技术途径，都会对我们的创造性思维有所启迪。当你参观展览会、音响实验室，或友人的音响系统时，你

可以作比较，了解最新的技术成就和技术指标，从对比和发展中得到收益。

b. 在工业设计思想方面的启迪，包括从美观、舒适、实用、经济等方面，都会受到启迪。也可以同其他同类或非同类产品作比较。

c. 当你在优美的环境中欣赏优美的音乐，沉浸在美的意境中的时候，无论从对音乐内容的理解、引起的共鸣、激发的遐想中，都会净化你的心灵，使你对人生的追求有更进一步的思考。

当前“发烧”音响流行，许多“发烧友”都自行挑选、改装组合音响中的各部件，以求更好的效果。

思考题：

1. 目前，家庭用组合音响系统已从落地式改为流行小型、台式的，还增加了许多自动调节各种音乐的频响、频谱显示，动态显示，超低音喇叭等。如果你要去选购录音机、磁带或在室内布置音响系统，或在演唱或演奏时使用传声器，你认为最主要的要注意些什么？

2. 如果你要购置一套家用组合音响，根据你的兴趣爱好、已有设备情况、经济条件及发展前景，你如何选择购置的规格和优先顺序？

3. 列出输出入功率比与功率电平（dB）的关系。

4. 把以下的 dB 数变换为实际的百分比或倍数。

a、RIAA 偏差 0.3dB；

b、低频滤波特性是-12dB/oct；

c、音调控制特性，相对 1kHz±10dB；

d、左右耳差 15dB 可隔离；

5. 把以下百分比变成 dB 数；

a、高次谐波失真率是 0.0015%；

b、信噪比 10；

6. 录音机转速提高了 0.5%，相当于音高提高了多少音分？如果原来是 a^1 音，现在的声音频率是多少？

7. 听一盘录制质量很差的录音带，指出可能的原因是什么？

参考资料：

1. 日立音响技术学校编，李慧芬译：《音响系统入门》，新时代出版社（1985）。

2. M、L. 盖福法著、包紫薇等译：《电声学、传感器、耳机和扬声器》，科学出版社（1981）。

3. 管善群：《电声技术基础》，人民邮电出版社（1984）。

4. 田进勤：《电子乐器》，人民邮电出版社。（1984）。

5. 马丁·克利福：《传声器，工作原理和使用》，中国声学会录音师进修班讲义（1984）。

6. 国家标准局有关产品标准。

7. 山水（SANSUI）、索尼（SONY）音响技术说明书。

8、周则时：《立体声》，人民邮电出版社（1982）。

9. 《高保真音频设备和系统最低性能要求》（IEC 标准）。

第十章　计算机音乐

§10.1　计算机音乐（Computer Music）的发展

计算机科学是直接基于电子技术而发展的，计算机音乐也是由电子音乐发展而来的。早在十九世纪中叶已经有了电子音乐，即是由电振荡产生乐音。1904年，美国制造出了波形发声器，可以产生不同音色的乐音，建立了第一个电子音乐实验室。以后又趋于冷落。真正发展电子音乐还在第二次世界大战以后。

50年代初，有一群音乐家和科学家在巴黎广播电台制作了一种“具体音乐”(Musiqui Concrete)，这是一种把自然声和电声效果声记录下来的可供作曲家作为素材来应用的声音，可以改变速度、音高、音量、波形、包络，加上混响等，这就开创了用人工制作音乐的先驱。但这时往往要花费好几个小时才能产生几分钟的音乐。

后来，在1955年，美国R·C·A公司制成一台用纸带输入，把声音的制作、控制系统集中于一体的电子音乐合成器（Electronic Music Synthesizer）。这台机器是一个庞然大物，重200吨，搬动时必须拆开来，造价合现在为25万美元。它可以产生十二平均律音阶。当然，距有实用价值还很远。

四年以后，在纽约（New York City）的哥伦比亚大学（Columbia University）制作了一个有所改进的电子合成器，可以改变音高、时值、音色、力度和节奏型等，还是用纸带输入，如图10-1所示。

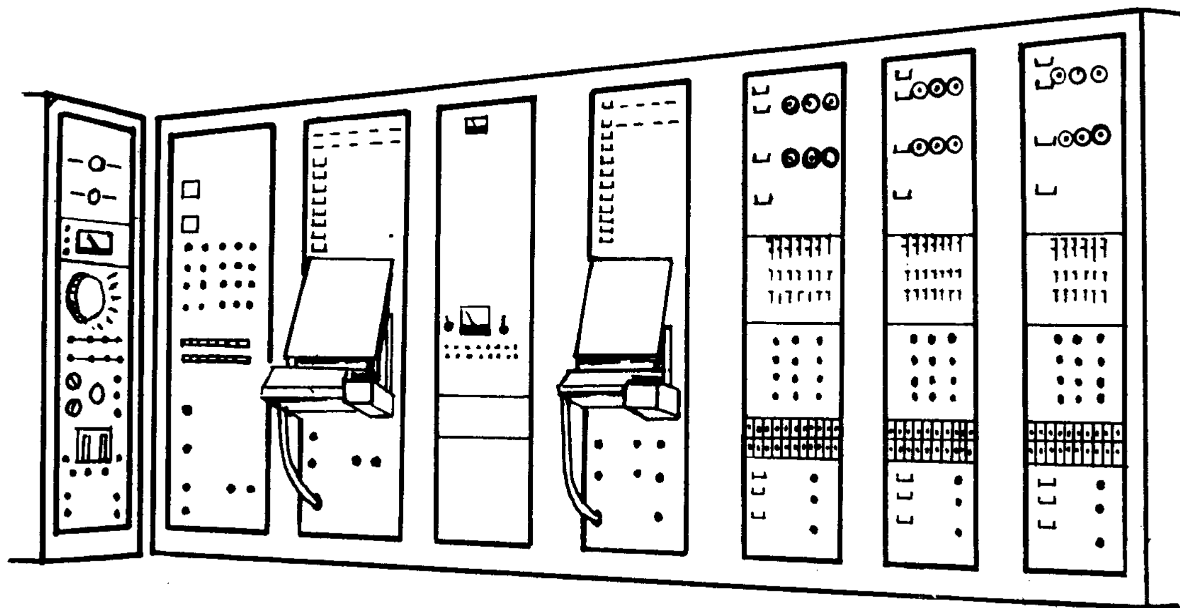


图10-1　最早的电子合成器

60年代初，合成器被装上了琴键，后来得到不断完善并商品化。

在一个相当长的时间里，计算机音乐家们要自己编语言程序，甚至用汇编语言或机器语言，输入通用计算机，根据音乐的各种参量，找出相应的计算机参量，把计算机作为一个音

乐声发生器来使用。

到70年代特别是80年代，计算机音乐迅速发展。一方面是各种合成器日新月异，功能越来越多，使用越来越方便，价格越来越便宜。80年代初发明了乐器数字接口（MIDI，Musical Instrument Digital Interface），更是大大促进了合成器音乐的繁荣，从而与合成器配套生产了各种音序器、鼓机、音源器、效果器等，大大发展了音响器材的生产。另一方面是利用个人计算机发展其音乐功能及开发为音乐研究服务的各种个人计算机。近年来，多媒体及信息高速公路又迅速发展。

1975年成立了国际计算机音乐协会，发行了《计算机音乐》（Computer Music）杂志，从1974年起每年在世界各地开一次计算机音乐国际交流会。

上海交通大学于1984年建立了我国的第一个"电子计算机音乐实验室"。天津音乐学院、上海交通大学、上海音乐学院在1986、1988年曾两次邀外国专家前来讲学，为我国计算机音乐发展起了先驱作用。1987年，北京大学成立了"音乐声学与计算机音乐研究室"，中国音乐学院等也建立了电子音乐研究室。1994年，中央音乐学院成立了中国现代电子音乐中心。后来国内许多企业如华彩、四通、天琴、和声、华远等公司以及1990年成立的北京迷笛（MIDI）演艺器材中心等也经营电子合成器和MIDI器材，也做一些商业性的开发工作。1990年，东方歌舞团举办了国内第一次计算机音乐会。1991和1992年，北京大学北京现代物理研究中心举办了2次全国"音乐物理与音乐心理研讨会"（含计算机音乐），1994年举办了首届中日音乐声学研讨会，也进一步推动了我国音乐与自然科学的结合及计算机音乐的发展。目前全国许多理工科大学、音乐院校都已开始了有关计算机音乐各个方面的研究工作。

§10.2 计算机音乐的内容

计算机音乐包含的内容极为广泛，我们把凡是使用数字技术及CPU（中央处理单元）或利用计算机所做的有关音乐的工作和活动都包括在内。几乎传统音乐所涉及的一切方面，计算机都可以渗入。计算机还给音乐开拓了前所未有的广阔天地。从已有的材料和信息来看，计算机音乐包含有以下一些主要方面的内容：

10.2.1 声音的数字合成

各种声音都可以根据声音的原形，进行分析后，再用计算机技术予以合成。语言声可以合成，效果声可以合成，音乐声也可以合成。这是声音数字合成的一个方面。

声音数字合成的另一个方面是可以随意产生自然声中还未有过的各种声音。按什么样的模式、要素和理论来合成新的声音以及它们的听感如何，是个需要研究、开拓的课题。

音乐声的数字合成常见的是用于合成器、数字音源器、鼓机（节奏发生器）等成件仪器以及用于合成器的含各种音色及特殊效果声的音源块（已制成ROM及软盘）、电子琴或其他地方用的音源片等。

声的数字合成有许多种方式，如压控方式、FM（调频）方式、PCM（脉冲数码调制）方式等。

声音的数字合成方式包括有两套内容，一方面是单个音源或音色的合成的方式，另一方面是诸个音元的组合方式。这些都在不断的发展。

关于声音的数字合成方法，我们将在下面介绍合成器时作进一步的阐述。

10.2.2 音乐的数字录音

数字录音是近年来新发展的一种技术，是计算机技术在录音领域的应用。它的基本工作程序是：输入信号取样后，经过A/D转换，即数字化及编码后，变成记录信号贮存；在放音时通过旋转磁鼓得到数字方式的再生信号，再经过D/A转换，即把数字信号又回复为模拟信号，再通过低通滤波器，变成再生信号。而一般的模拟录音是把输入信号通过记录放大器及记录磁头直接记录在磁带上，然后通过再生磁头、再生放大器变成再生信号。

数字录音比一般的模拟录音有以下优点：

1）频率特性好。在20Hz-20kHz间的频响曲线几乎是平直的，因此保真性能好；

2）动态范围大。模拟录音一般只能达到60dB，而数字录音可达90dB；

3）数字录音可以通过贮存的时钟脉冲调整，使抖晃趋于零；

4）信噪比高，无磁源噪声和调制噪声，可以使信号失真极小；

5）对失落信号可以补偿恢复；

6）经过多次复制后不会降低声音质量；

7）节目搜索时间短，几乎是瞬时的，而且可以任意搜索规定区，不像一般模拟录音带只能搜索空白区，而且数字录音在搜索时不影响磁迹；

8）重放的精度高，不会改变速度；

9）记录密度高，记录时间长；

10）体积小，保管面积是开盘磁带的1/15。

目前市场上已有成套的包括录音、放音、编辑功能的数字录音机系统投放，还有各种配套设备，如把模拟带变为数字带的复制系统，与录像机配合的视频跟踪系统等。

10.2.3 声音的数字控制

声音的数字控制指的是对数字化了的声音信号进行加工、编辑或控制。

在数字录放音系统中，把通过A/D转换数字化了的信号给予调整或补偿，也是一种声音的数字控制。多轨数字录音的合成、等时、同步等也是一种数字控制。

在电脑音乐系统中，作为音乐计算机的主机或音序器，都是在实行对声音的数字控制。这也将在下面再作进一步讨论。

音乐喷泉，色彩音乐等也可以是一种声音的数字控制。目前有的是把音乐的强度信号转换成数字信号，通过单板机或单片机去控制对应的喷泉量或者映出对应的色彩或控制灯光。当然也可以设想通过音高、时值、相位、甚至音色等去控制。也可以把任何有变化的节律或参量转化为音乐，例如，把流水、海浪、语言、色彩、明暗、物质 的大小排列等等通过计算机变成音乐。

在人机合奏、实时伴奏时如何用某种节拍信息，如拍手、周期性的重音等去掌握计算机控制的伴奏音乐速度的变化，以跟上演唱者的拍子，也是正在探索的试验课题。如果这个问题解决了，将使“卡拉OK”上升到一个新的水平。

10.2.4 乐器的数字接口（MIDI）

MIDI（Musical Instrument Digital Interface）的直译是乐器的数字接口，是为实时地传输音乐的定时和控制信息的一组数字编码，以及传输这此数码的硬件接口的技术规范。戴维·斯密司（David Smith）和切特·伍德（Chet Wood）于1981年在美国第70届音频工程协会会议上，提出了数字“乐器互连标准”或“通用合成器接口”，1982年改名为“乐器数字接口”，同时八家生产乐器的厂家取得了技术指标上的一致意见。随后几年里，MIDI得到极迅速的发展，已经大量被使用。在舞台上把合成器、鼓机、音序器进行联调：在实验室或演播室里，用MIDI支撑的软件把个人计算机用于制作乐曲；在学校里用MIDI接口使音乐教育更趋于方便；在家庭里可以把电子琴与计算机进行联调，进行高层次的作曲游戏；通过MIDI可以改变“卡拉OK”曲子的调高、速度，以适应各种人的演唱。

MIDI是传输音乐数字讯号的接口，它是一种串行的接口，即数码流是顺序被传输的，每个传播状态和数据信息的MIDI字节（Byte）长8个比特（Bit），即有$2^8=256$个可能情况，也就是说，通过一个字节，每种信息最多可以取256个可能值之一，如果扣除第一个比特是用以确定字节性质的，另外，还可以有$2^7=128$个情况，这也是许多合成器和数字乐器常用的可改变状态数是128的原因。每个MIDI码通常由一个状态字节和0至2个数据字节组成，在状态字节后再跟随数据字节。通过MIDI可以传输的状态信息有控制整个系统的系统信息或控制16个通道 中某一个通道 的通道信息。这些信息可以控制键号、下键速度、触键后力度、节目变化、压力变化、音高调制以及写入其他信息等。每一件MIDI器件都有MIDI执行表，来表明它可以有哪些MIDI功能。

利用MIDI，除了靠计算机作为主机，或者用音序器控制以外，还可以用MIDI网络中的一件乐器去控制其它乐器。

现在，所有的合成器、音序器、音源器、鼓机等数字乐器都有MIDI接口，许多通用的个人计算机也带有MIDI，高档的电子琴也带有MIDI。

随着个人计算机的普及、人们文化素质和音乐水平的提高以及电子乐器的价格下降，MIDI系统将会进入一般家庭之中。

关于MIDI乐器的连接、使用，我们在下面“电脑音乐系统”一节中再予以介绍。

10.2.5 计算机作曲

计算机作曲应该包括利用计算机产生由音符或节奏组成的前所未有的创作乐曲，并把它演奏出来。我们把计算机作曲分为：

1）随机作曲

实际上，不存在彻头彻尾的随机作曲，总是要规定一定的音名（半音阶或全音阶或其它1/4音阶等）、音高范围（可取音高的集合）、时值取值（或者哪几种取值的集合），然后让计算机随机产生旋律，这就算是计算随机作曲了。在计算机音乐的初起时期，许多人都做过这种尝试。

随机作曲常是单音的旋律。当然，除乐音外，你还可以加上其他声音，或配以和弦。但迄今为止还未听到过有很好的随机计算机作曲的音乐作品。

2）逻辑作曲

把作曲规则或其他限制一一加到随机作曲方法上，如规定大跳不得超过几度且不得连续多少次，多少度的大跳后必须把旋律逆行，规定起始音、结束音，不准增四度上行等等，而且可以任意加上你想加的、或放宽你认为可以放宽的规则。这样，你可以得到还能听得过去的旋律，但实用价值不大。

逻辑作曲还可以把作品分成几个“子块”，每个“子块”按要求可以成为大调性的或小调性的，然后再按一定规则进行组合，如按顺序第1、2、4“子块”是一种调性（大调性或小调性），第3“子块”则是另一种调性等。这也能得到一些听得过去的音乐旋律，但也无大的应用价值。

3）智能作曲

这是人们总是梦想实现的，即让计算机能代替作曲家作曲。已经可以做到根据某些作曲经验安排作曲，如在高潮时（假定以持续的高音代表高潮）演奏速度自动略略放慢，在出现了有一定时间持续的同一调性之后自动地在短时间内改变调性，并随后又恢复原调性等。

美国也曾有人试图用作曲者的脑电波来产生音乐，权且也算作一种特殊的“智能作曲”。

距计算机可以代替作曲家作出好曲子来还遥遥无期；也许，这仅仅是一种追求的“目标”而已。

10.2.6 计算机辅助作曲

许多音乐电脑系统上所说的计算机作曲，实际上是计算机辅助作曲，这里也包括演奏。计算机辅助作曲可以有以下几类：

1）音乐的输入、显示、贮存和重放，这里还包括修改和乐谱的打印。一般通用计算机都有简单的音乐功能，如“Sound”语句，“Music”语句等。在这些语句下，每一键有一定的音高（按音名或规定的序号，如按钢琴键号，c^1为40，a^1为49等）和时值，可存贮并奏出单音旋律来。许多通用计算机机内已贮存有几首简单的乐曲。在计算机上输入音乐可以用机键输入，可以用琴键输入，也可以用鼠标器在屏幕上摘取音符摆在五线谱或简谱上输入，还可以由磁带或软盘输入。每个通道里允许有多声部输入。有的计算机还有多通道输入，即可用于多种乐器的配器和同时演奏。

有没有显示操作者输入音乐的乐谱这种功能，是计算机音乐功能强弱的一大标志。显示一般是五线谱的。显示乐谱时能否有三连音、联接线、强弱符号等也是表示各不相同的水平。

接上专用的打印卡，还可以把乐谱打印出来。现在用激光打印机打印乐谱已不少见。能显示乐谱，当然也要能修改。修改可能用机键、琴键或鼠标器。

对于一些机内没有的符号，要能够很快“制造出来”。这是前期的计算机打印乐谱缺少的功能。

一般音乐电脑的放音可以选用多种音色。放音可以选用机内音色，也可以连接合成器。

目前已有许多功能很好的音乐电脑，如Macintouth机等。在各种个人计算机上，如IBM机上加一块音乐卡，就可以有加强的音乐功能。Apple-Ⅱ型机、中华学习机等也正在扩展音乐功能。

用计算机输入和重放音乐的优点在于，可以改变速度、改变音色，可以修改、编辑，还可以实现有些非常快速或极不易演奏的音乐。特别是对于有些不能从乐谱上很好把握音高、节拍和整体效果的人，是有很大好处的。但是，除了琴键输入以外，其他输入方式都很费时、费

事。

2）自动伴奏、配器

用计算机根据规定的拍子、速度和规则（如按每拍或每小节）选择一定音型，配上伴奏，也是计算机辅助作曲的一种方式。

现有的高级音乐软件已经有按着某种调式、和弦变化、曲式、节奏型、旋律音型、织体结构和整体风格等编就的程序，只要你任意输入一些音符，就可以奏出酷似该种风格、体裁的音乐，如玛祖卡舞曲、迪斯科舞曲等，只是旋律是根据你输入的几个音而定的。

3）背景音乐

在电影、电视、配乐诗朗诵以及一些展览会或其他工作或休息场合，常需要长时间的、不间断的、有变化而不重复并风格适应的音乐背景，但又并不要求很规整的曲式或很优美的旋律。可以用计算机去发生这种旋律，这是最简单而且能符合上述要求的。这种音乐，如果要作曲家去写作，演奏家去演奏，都嫌费事，且欠创造性，而寻找音乐资料又常一时遇不到合适的，又花时间。于是可以选择一些适合的"动机"和素材，如内蒙草原风格、河南梆子曲调等，让计算机去完成随机组合，按一定程序去发挥，变换速度、音色等。实践表明，这是行之有效的，有些可以直接截取使用，有些可以得到启迪。

10.2.7 计算机音乐作品

以计算机或音序器为中心，配以合成器、数字音源、效果器、调音台及多轨录音机等，用乐器的数字接口（MIDI）连接成为音乐电脑系统，可以制作计算机音乐作品。由于利用了计算机，可以做到有无比丰富的音色，任意变化的节奏，按程序变换或交叠的序列，极其细分的微分音，非常快速的旋律进行，无限长的长音。随心移动的声像，令人"耳花缭乱"的装饰音等等，这些都是常规乐器所不能达到的。

实际上，这是计算机辅助作曲的成果，也是利用了 MIDI 系统。现在已经有各种版本的作曲软件供使用。

也可以直接用计算机编程制作音乐作品。计算机音乐作品可以是严肃音乐，也大量用于通俗音乐。

10.2.8 计算机记谱、读谱，机械手演奏

1）记谱

用键盘输入，记下乐谱来，这种计算机记谱已在前面计算机"辅助作曲"一节中讲过了。人们曾长期致力于把歌声变成乐谱，特别是在整理民歌的工作中，积累了大量录音带，如何把它们变成乐谱呢？国内外都有人尝试过，据报导有过一定结果，但也要有辅助的办法。

实现计算机实时记谱的困难是很大的。首先，没有伴奏的实时的歌唱的音高标准很难确定，常常是距标准音调很远（例如差几十音分），而且不时游动。还有，光就一般人（包括训练有素的歌唱家）来说，保持发某一音高的音，就会有几十音分甚至更多的上下波动。即使用具有很好音高标准的乐器，在演奏中，偏离标准音高几十音分也是常有的。这样就会造成按谱上或主观唱出的应是同一个音高，但记下的谱上却会出现在两个或更多个半音上。升降号的用法也很繁琐，按固定唱名法记下的谱又常常有许多升降号，看起来很不习惯，也不实用。速度和节奏的把握也是问题。按怎样的速度记谱？多长时间是一拍？这也无法规定，即

使规定了也在变。因此，记下的谱上又都是隔小节的连音号而且无法划分小节线！

还有，对于不同调性，也无法反映，只会搅得乱成一团，等等。所以，用计算机实时记谱还远远代替不了人的整理。

2）读谱

曾经有人建议开发一种计算机读谱演奏系统，让“机器人眼”看着乐谱就能演奏，以供作曲家或作曲系学生试听自己作品的效果时用。这种设想也是难以实现的。首先，谱线、谱表、符号必须绝对标准化，而且谱纸上任意一点污斑都会被“机器人眼”认为是一个符号。还要区别符杆，符尾，时值，一种乐器中的多声部及多种乐器等等，这就对扫描器提出了极高的技术要求。即使技术问题解决了，要在每次输入前为之画出标准谱，也还不如直接输入音符省事。因此，这种设想也是不现实的。

3）机械臂演奏

曾经在展览会上展出过日本制作的机器人用机械臂演奏钢琴。这不过是一种表现高技术水平的显示而已，没有实用价值。

10.2.9 计算机音乐作品分析

已有的用计算机分析音乐作品，有对作品中旋律进行时相邻音之间的音程分析，有对上下行级进和跳进规律的分析，有对乐曲中使用的各级和弦出现次数或累计时值的分析等。通过这些分析能发现某个作曲家如贝多芬作品的特点。还有通过各音出现次数、频度和结束音等进行调式分析，如判断各地单旋律的民歌的调式。还有节奏分析、模式识别、动态分析等等。

对音乐作品的长时间谱分析，寻求其频谱的包络线与频率的关系，即 f^n谱，然后与作品的听感联系，也是正在进行的一种结合作品分析的音乐心理研究。

用计算机对音乐作品是可以作种种分析的，但是，选择哪些参量作分析？数据如何处理？对作品作这样那样分析的目的性，如何通过作品分析结果寻求听觉心理与音乐的关系等等，都是可以探讨的。

10.2.10 用计算机作音乐的理论研究和探索

这包括两个方面的工作：

1）把计算机作为计算工具的音乐研究

有把一些数学方法、数学模式用于乐器声学，如用有限元方法计算钢琴、提琴音板的振动。有用于音律学，如用数论方法探求平均律制的选择。有用于音乐现象本身的研究，如用分形、自相似原理等研究音乐中的排线性现象，还有把模糊数学理论用于音乐的评价等。（*

2）用计算机进一步探求音乐的本质

音乐的本质是什么？音乐本身有些什么内在的规律？音乐与数学的关系到底如何？音乐与自然，与其他科学，与人类的其他活动有哪些共同的规律等等，都是人们特别是哲学家们关注的课题。

当计算机作为处理极其大量信息的工具出现以后，就可以进一步开展对这些问题的研究

---

* 《全国首届音乐物理、音乐心理研讨会文集》中刘宝利、关洪、孙宗琦、包紫薇等论文。

和系统分析，向广、深、细微处进展。这方面还有待于数学家、哲学家与音乐家的合作。

10.2.11 用计算机作音乐的实验研究和探索

这也包括两个方面的工作：

1）把计算机作为实验手段的音乐研究，有：

用计算机可以作频谱分析，包络分析，波形分析，瞬态分析，绘制三维声图，测量基频等；也可以作为声学工作站，替代各种声学测量仪器。这些已是行之有效的现实。

通过 A/D 转换，直接研究乐器的振动模式，应力分布和结构参量。

在音乐电声中，室内声场效果的自动调整与均衡，也是常常通过计算机完成的。

在制作音质主观评价的测听带中，如把握短的时值、微小的音高差、小的声强差等，用单板机控制，可以更为准确方便。

2）用计算机进一步探索音乐和听觉的本质

例如，为研究听觉暂留的存在与否，要研究声的起始、结束状态，要系统地重现各种音色。

轮流快速地发出和弦中的几个音，试验有没有和声的听感等，都要用计算机来实现。

10.2.12 计算声学

在现时有人认为，物理学除了理论物理、实验物理两大门类以外，还有一类计算物理。计算声学是计算物理的一个分支。80 年代后期，计算声学正在国际上兴起。

计算声学实际上是一种计算机模拟。在室内音乐声中，可以用于计算剧院、家庭居室或汽车音响的室内声场分布。例如日本曾报导过用十分之一的模型测量和计算一所音乐厅里的声学状况。在乐器声学中，例如计算律管音孔位置，形状，管径，管径的变化，吹口边棱状况及管尾长短等对于音高或音质的影响，以及对于的音孔位置的研究等。还可以设计出可以直接听到上述结果声音的计算机程序。在嗓声研究中，国外有把声带用双质量振子模型来近似的计算机模拟，也有把声带的运动作为一个简单的张合振动加绕一点的角振动的合成来模拟，研究通过声门气流的速度分布、流场以及附近肌肉的力场分布等。

计算机模拟与实验结果结合起来，可以有效地研究音乐声学中的许多问题。这方面现在还刚刚开始。但是由于音乐问题包括乐器制造问题的因素极多，而且有许多心理因素，所以目前还仅仅停留在一些理论分析上，多是解释性的，还未见有太多对实际的指导意义。

10.2.13 计算机与音乐教学

利用计算机进行音乐教学是计算机音乐的一大应用领域。用计算机进行音乐教学可以把图形、文字、符号、谱表与发声结合起来，还可以是实时的、动态的，并可进行提示。例如，关于音名的教学，在屏幕上可以写出音名的符号 C、D、E、F、G 等，同时画出五线谱表，以闪亮表示音符在谱表上的位置，又同时出现琴键，显示出该音在琴键上的位置，还同时发声，这就等于是一次现场教学了。

利用计算机还可以做习题和练习，如记谱，识谱，辨别和弦、和弦的转位和连接等，计算机会立即回答是否正确。

可以用游戏的形式进行练习，如练耳和记忆，记你重复计算机连续发出的音，逐个增加。

可以打擂台，比分数等，寓教学于游戏之中。国外，计算机上的音乐游戏也是很流行的。

用计算机进行音乐教育的内容有乐理知识，练耳，作曲，乐器学习等。利用声控原理进行视唱教学也是可以发展的。

以上是计算机音乐内容的一些主要方面，这些方面的内容都还在发展，而且还可以有更新的领域。有些问题将在以下章节中进一步阐述。

§10.3　电脑音乐系统（MIDI系统）

电脑音乐系统是把音乐电脑作为主机，同音源或音乐输入系统或效果器等，用音乐数字接口（MIDI）连接起来，实行音乐创作、制作和演奏。计算机音乐系统，不管是用电脑或音序器（也是一种电脑）作为主机，由于通常是用MIDI连接，所以也常被称为MIDI系统。严格意议上这二者是有区别的。国际上把用电脑音乐系统做成的音乐统称电子音乐。

10.3.1　电脑音乐系统（MIDI系统）的构成

电脑音乐演奏系统由以下几个基本部分构成：

1）音乐电脑

这是MIDI系统的中枢和头脑，可以由专用的音序器（Sequensor）充当，或者由个人计算机（PC机，Personal　Computer）充当。有些音乐功能强的个人计算机可以直接起音序器的作用，有的需要再加上一张音乐卡（硬件）。

用计算机代替音序器，不仅有容量大，音轨多（可多达256轨等），可以附带打印谱表，用较大的屏幕显示等优点，而且还保持原有计算机的各种功能。加上其他专用硬卡和配套软件，还可以扩展成为多功能的音乐工作站。

音乐电脑中输入音乐的方法有用计算机键盘输入，利用合成器的琴键输入，磁带输入或软盘输入等。

2）音源

这是作为电脑音乐系统制作音乐时或实时演奏时以及输出已制作好的音乐时的音源。音源可以用专用的“音源模块”（Tone Generator Sound Module），即不带键盘的合成器，鼓机（Drum Machine），键盘式合成器，数码钢琴（Digital Piano）等。键盘式合成器也往往兼作输入和控制用。

对于一个键盘式合成器来说，在制作音乐时可以任意调制，产生不同的音色，然而在放音的时候就只能起一种乐器或两种乐器（有的合成器可把全键盘音域分为几种音色区域，分别控制）的作用。于是，曾经有过一个时期为了有多乐器效果，需要购置一大堆合成器。后来把多轨的音源做成一个不带琴键的小盒了，即音源模块，非但在制作音乐时，而且在放音时可以充当多个（一般至少是8个）独立的合成器，即相当于具有多种不同音色的乐器的乐队作用。

数码钢琴最近几年有越来越被重视的趋势，它的音色好而但可有多种变化，可以变调、记录、自动演奏、编程、作曲等。目前，其力度、手感已与传统钢琴相似。

鼓机，即节奏发生器（Rythum Generator），也是一种音源，可以产生各种打击乐或非乐音的音色，有预置的节奏型可供选择，还可以随意编辑成各种节奏音型。现在鼓机常常做在

音源器上，作为一个通道发声，导致专用的鼓机逐渐减少。

3）效果器

效果器(Effect Processor)可以产生人工延时(Artificial Delay)，人工混响(Artificial Reverberation)，体现厅堂深度效果的预延时（Pre-delay），回声效果（Echo），合唱效果，镶边效果、变调，失真等效果。每种效果又有不同程度的细分，可以整体控制，也可以分段控制等。效果器是对音响进行加工的一种附件。可参考第八章“音乐电声”。

4）声频输出部分

这包括混音器(Mixer，或叫调音台)、功率放大器和音箱输出部分。混音器把各音轨上记录的音乐混和起来，还可以分别加以调制加工。也可以输入多轨录音机（Multi-Recorder）。

5）MIDI 连接线

所有以上所述的部件都用专用的 MIDI 连接线，通过 MIDI 接口连接。

电脑音乐演奏系统的构成示意图如图 10-2。

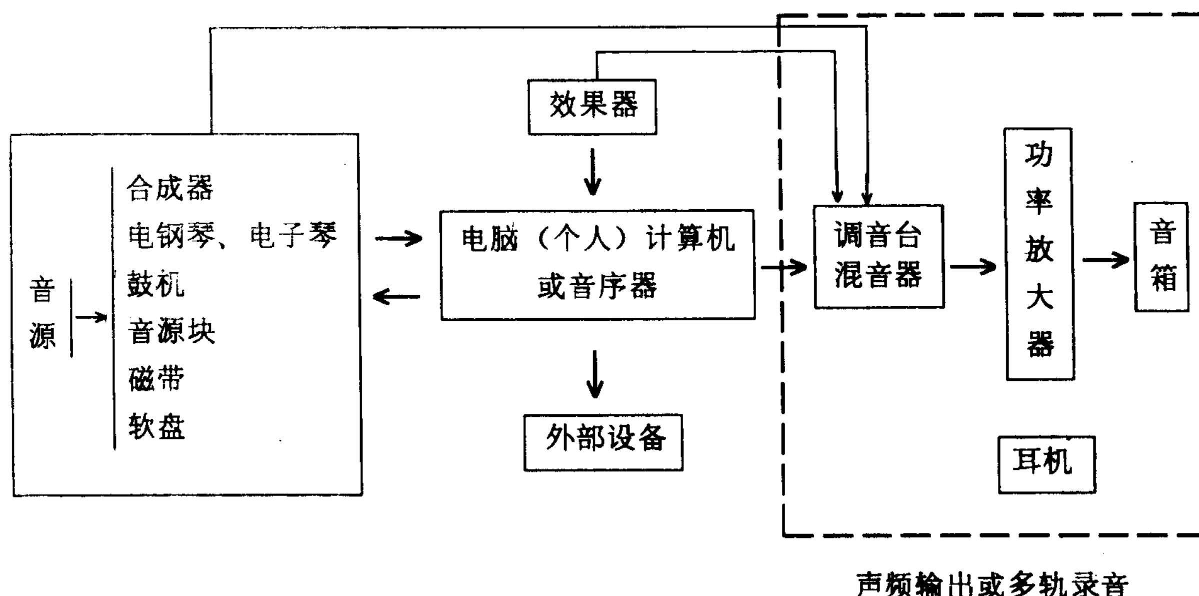


图 10-2　电脑音乐演奏系统

10.3.2　音序器

音序器有以下功能：

1）记录。可以记录实时的键盘演奏，也可以记录一个一个键入的音或来自磁带、软盘的音和其他通过 MIDI 传输进来的音。可以分段记录，分轨记录。对于一个不会演奏键盘乐器的人，也可以操作。记录的同时可以修改。可以用机内时钟，也可以用外部时钟。

2）贮存。音序器可以贮存大量音乐信息，常有 16000 个音符（QX-5）或更多，还可以扩展。用个人计算机作为音乐电脑的主机可以有更大的信息贮存量。

3）编辑。可以在已记录下来的信息上，对于各音轨任意进行插入（Insert），删节（Delete），量子化（Quantilize，即把键输入时各音时值不太准确的予以精确为整化），音轨互换（Exchange）、合并（Combine），摘取其中一部分等。

4）放音。放音时可以改变每个音的延续时间（Gatetime），取得分开或重合的听感，可以改变放音速度，可以改调等。

5）一般的音序器，如QX-5等有8个音轨，也有多至16个音轨的。记录在不同音轨里的不同音色，代表不同乐器的声音，可以合并并贮在一个音轨里放出。实际上这样就可以充作更多的轨来使用。音轨越多、录音、修改就越方便。

6）目前的音序器向更小、便携方向发展，如QY—10只有一架照相机这么大小。

10.3.3 合成器

合成器是从电子琴发展而来的，现在都已经是数字式的。合成器与电子琴的区别在于，合成器可以自行合成音色，而电子琴只是具有固定音色的合成器；电子琴都带有自身的放声系统，而合成器则没有声频输出部分。

电子钢琴也是一种有多种固定音色的合成器，由于钢琴的音色多样且有特殊的要求，因此，常作为专门的产品应市。鼓机也是一种合成器。

1）合成器的功能

合成器的功能有以下几项：

a. 制作声音。即制作各种音色和把音色组合，包括成为各种效果声。合成器可以模仿已有乐器声或自然声，也可以对已有的声音进行修改、加工，也可以产生前所未有的“新”的声音。用合成器还可以制作用人工演奏一般达不到的特别长时值和特别短时值的声音。

b. 贮存声音。在合成器内一般有机内本已存有的多种音色（如128种，256种），也可以把制作的或从外面输入的其他音色写入RAM（随机存取存储器）。

c. 使用专门配用的ROM（只读存储器）音色块或软件或采样器，可从中提取各种音色或声音。对于各种合成系列都有已开发的专用音色块或软件，配有如各国、各民族、各时期、各种牌号的键盘钢琴、电子钢琴、管风琴、各种铜管乐器、木管乐器、打击乐器的音色，以及海潮、流水、雷雨、风声，鸟、蝉、虫、蛙鸣声，鸡、犬、马、牛、猫、狗、羊、猪、狼、虎、熊、狮叫声，火车、汽车、飞机、轮船、枪、炮、火箭、脚步起动声，以及鼓掌，校园、球场，战场，街区闹市，春、夏、秋、冬等等各种声音的效果。还可以用采样器实录各种音色，拿来应用。

d. 合成器常常用作音源制作和实时演奏的输入键盘。

e. 通过MIDI，可以用合成器作为主机去控制其它乐器。

f. 合成器内有各种特殊功能，如改调，变化音尾，单键或在全键盘范围或分段控制音量变化、音高变化等等。

g. 带有软盘的合成器，可以实现合成器与软盘或只读存贮器（ROM）之间的信息互换，也可以贮存和应用MIDI信息。

h. 合成器还有外控设备，如脚控器、呼吸控制器等。

2）用合成器制作声音的方法

用合成器产生各种声音，首先要能产生各种音色的单一的声音单元，然后再把这些单一的声音单元用各种方法或方式组合起来。

最初的首先合成音色的是法国人斯托克豪森（Stockhausen），当时他产生单个音用的方法是用若干台普通的正弦波发生器连在一起，每一台选择不同的频率和振幅，然后把这些正弦

波叠加在一起产生人工音色。后来，美国人罗伯特·穆格（Rolert Moog）首先研制成功压控式音响合成器，可以对频率、振幅、波形、时间、包络线等进行调制，产生不同音色。其基本原理和过程是：由低频振荡器产生一个基本音调，用放大器调制其振幅，由包络发生器（Envelop Generator）产生一定音态（Shape），滤波器则用以调制其谐波成分，这样来改变音色。

近年来，随着电子技术、大规模集成电路技术、数字音频技术以及计算机技术的发展，音色合成的方法也日新月异。如调频（FM Freqency Modulation）方法，其基本原理是将两个简单的正弦波或简单的波形信号，通过不同排列组合以及改变其相互间的电压、频率、相位等，调制成各种合成的波形，即不同音色。这种方式有很大变化余地，但较难制造出特定的主观音色。DX7、DX11、DX1 合成器，CLP30、FP2000 电子钢琴等都采用这种方法。已发展了 AFM（Advanced Frequency Modulation）方法。

直接波形记忆方法（AWM Code Advanced Wave Memory），其基本原理是把各种乐器的波形特征贮存在 ROM 中，制作音色时由这些已贮存在 ROM 中的数据产生音源振荡，以取得较好的仿真效果。但音色只能围绕在 ROM 中已固化的内容作稍稍变化，如 CLP550、YPP-50 电子钢琴，RXS 鼓机等不需要合成功能的音源器件中常用这种方法。

减法型合成技术是对一些含有丰富谐波的简单波形如方波、锯齿波、三角波、阶梯波的谐波参量（主要是频率特性）进行调制，或随包络发生器改变滤波特性，从而改变信号的谐波分布，达到合成音色的目的。如 JX8P 合成器采用这种方法，音色有很大的可塑性。

脉冲数码调制（PCM Pulse Code Modulation）方法，这是对波型进行采样，通常是以十几 K 到几十 K 的采样频率进行逼真地采样，然后进行调制。如 W30 采样合成器，S330、S550、S770 采样器模块等用的是这种方法。T_1、T_2、T_3、M_1 合成器用的是 AI 方法，这是 PCM 方法的扩展。还有波形工作站（W5 Wave Station）方法，这也是一种 PCM 方法，用游戏杆画出波形的包络。PCM 方法是当前很重要的一种方法。

然后，还可以对用以上各种方法生成的音色以种种方法组合、互调。如把 AWM 和 FM 组合，是 SY22 合成器及 TG3S 音源块等所用；把 AFM 和 AWM2（Advancel AWM）再加上一个实时卷积调制环路（RCM，Reatime Convolution Modulation），可以兼有几种音色发生系统的优点，如 SY77，SY99 合成器，TG77 音源块等所使用，既是 FM 音源，也实现各个 FM 音色单元之间的互调。

还有线性合成法（LA），是用减法型合成器和 PCM 及环形调制器的结合，如 D5，D10，D20，D50 合成器；超线性合成（SLA），如 D-70 合成器等。

94 年，又推出一种用计算机模型构造技术制造的自振荡虚拟真实音响（S/VA）合成器 VL-1，它利用物理模型编程如改变管乐器管长等，音色更为逼真，行为也更音乐化。

在具体操作时，可以用改变波形包络的方法，例如图 10-3 中，把波形包络分成几段，即 AB、BC、CD、DE、EF 等，通过改变 B、C、D、E、点的位置，即相对幅度，以及 AB、BC、CD、DE、EF 各段的斜率，可进行音色的设计。

3）合成器的发展趋势

由于市场的大量需求，合成器的发展非常之快，各厂家每年都推出新的批型，其发展趋势是：

a. 采用更先进的音色合成方法。如前所述，以取得更多的音色和音色组合，更好的合成

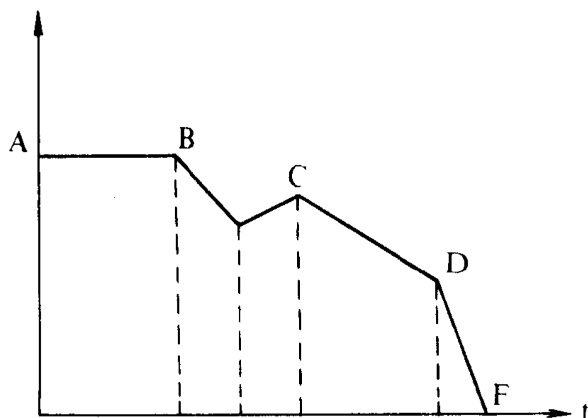


图 10-3 波形包络

效果，更方便的随心所欲的调制操作。

b. 扩展容量。通过扩展槽口，增加软盘驱动器甚至硬盘，增加存贮及使用功能。最大发音数也已从 16 个增至 32 个。有的合成器把键盘从 61 键扩展到 76 键等。

c. 功能多样化，综合化。如一台合成器从单一声源变为 2 个声部至现有的有 8 个声部，即通过音序器或电脑控制，在放音时可以代表 8 种乐器组成的乐队；又如把鼓机功能放入合成器内或合成音源块内，从而取消了独立的鼓机。再有，把音序器（8 轨，8+1 轨，16 轨）放入合成器内，这样，一台合成器就成为一个电脑音乐系统了。

d. 扩展功能。如有的合成器增加了“Chase”（原意“跟随”），即经预置，按琴键发音后可跟随两个大小二度或小三度音。有的有音色的“Layer”（原意“重叠”）功能，即轻奏或重奏（用力大）时有不同的声音，或一键含有 A、B 两种音色，轻奏时以 A 为主，重奏以 B 为主等。

e. 使用方便。已有的多种音色及效果声的 ROM 及软件，可以使你得到各种声源。采样合成器和采样器的使用，使你可以方便地重现你所能找到的特定的音色源。这两者互为补充，使合成器的音色极为丰富而使用方便。合成器音乐在舞台上常常是人机共奏的，即一方面从电脑中放出预制的音乐，一方面由演奏员加上键盘的演奏及控制。还有，在演奏过程中。音色的改变除了按在程序中已编制的进行以外，还可以更方便地通过按下某一个键钮，即可瞬时全盘改变，而不是还需要较多操作。

10.3.4 MIDI 系统的连接

1）MIDI 系统的基本连接方法

现时的每种 MIDI 器材都有三个插座。面对插痤，自右至左为 MIDI in（输入接口）一用来接收 MIDI 信息，MIDI out（输出接口）一用来输出 MIDI 信息，和 MIDI thru（经过接口）一用来通过 MIDI 信息。如图 10-4 所示。两件 MIDI 器材之间用 MIDI 电缆连接。MIDI 电缆的两端各有一个五针接头，与五孔的 MIDI 插座相匹配。要注意的是，MIDI 插座与放音机上的“DIN SYNC”插座形状相同，但功能完全不同，不要用错。MIDI 电缆也是专用的，是双向的。

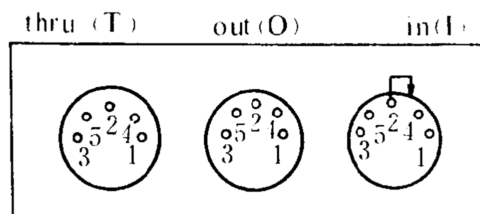


图 10-4 MIDI 插座

利用 MIDI，可以用一台主合成器控制一台从合成器或音源模块，如图 10-5 所示。这时主合成器是 MIDI out，从合成器是 MIDI in。

用一台主合成器也可以控制多台从合成器，如图 10-6 所示。这时要利用 MIDI thru。根据你的要求，给予不同的 MIDI 信息，可以任意选择分别控制其中某一台、某几台或整个控制。

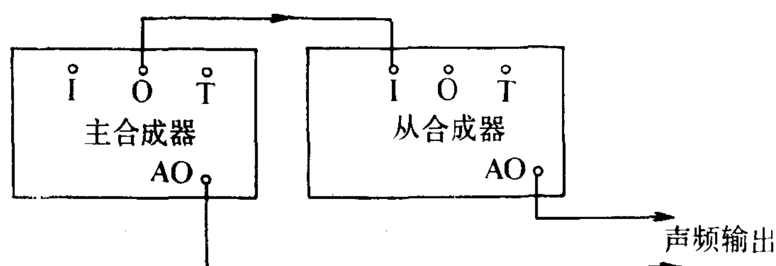


图 10-5　MIDI 接法，一台主合成器带一台从合成器

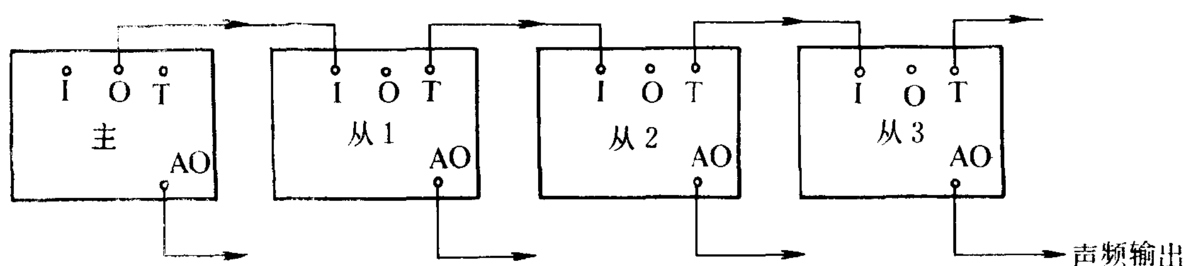


图 10-6　MIDI 接法，一如主合成器带多台从合成器

原则上，MIDI 有 16 个通道，可以用 MIDI Thru 一个接一个串连并控制，但实用上不可串接这么多，一般 MIDI Thru 超过四、五件器材时，MIDI 信息的传递就会出现问题。要用 MIDI Thru 箱或输出选择器，如图 10-7 所示。

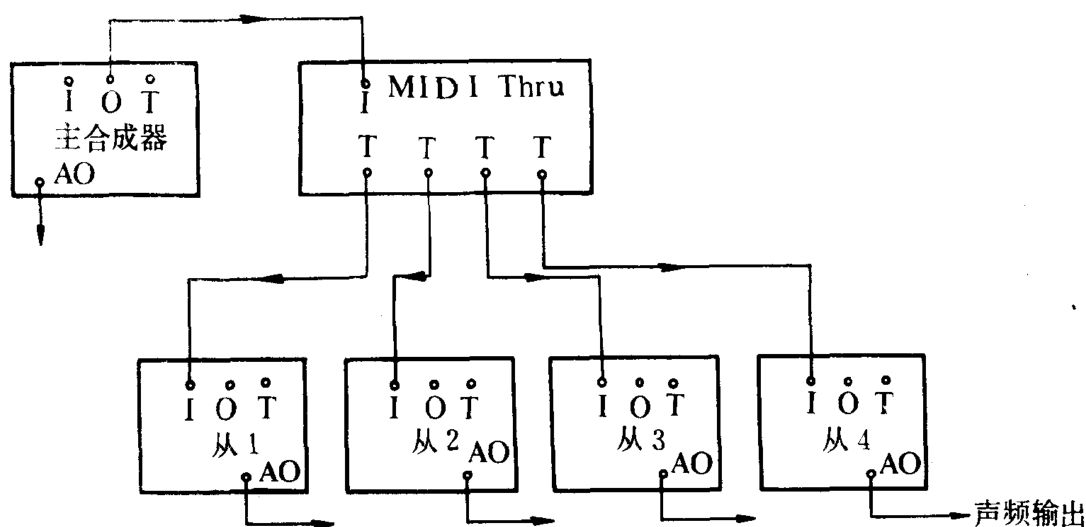


图 10-7　MIDI 接法，用 MIDI Thru 箱

如果利用电脑（音序器或计算机主机），则简单的 MIDI 网络如图 10-8。

这样连接，音序器与合成器已经成为一个环路，即音序器可以从合成器接收 MIDI 信息，

予以录入、编辑、贮存，又可以使合成器作为放声时的音源。同样，合成器或其他乐器等还可以连接，或都用音序器控制，或可以用MIDI Thrn 箱。音序器也可以代之以个人计算机，用计算机代替音序器时通常要通过一个MIDI 连接器（MIDI Passport）。

2）MIDI 执行表

接通各件乐器端的MIDI 通道以后，并不是所有的MIDI 信息对于每个乐器都是能接受或传输的，也就是说，每件MIDI 乐器各有不同的MIDI 功能。于是每件MIDI 乐器都有一张同样大小、同样规格的MIDI 执行表（MIDI Implementation Chart），说明它能发送和接收什么MIDI 信息，把这两张表拼叠在一起，即把主乐器的“传递”（Trans-mitted）项（可发送否）与从乐器的“认可”（Recognized）项（可接收否）放在一起，如图10-9 所示，就一目了然了。

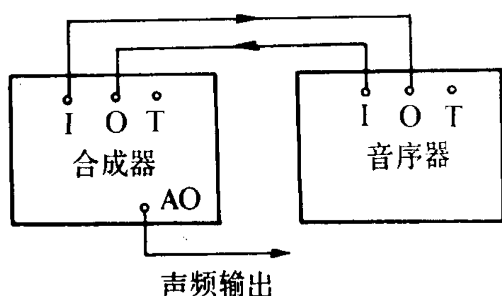


图 10-8　合成器与音序器接成环路

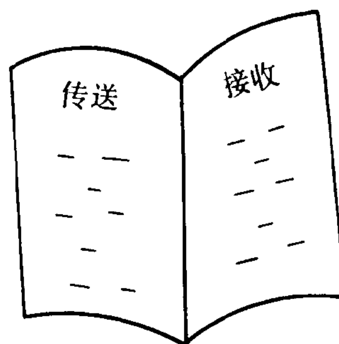


图 10-9　MIDI 执行表

MIDI 执行表有以下项目，列出这些项目，可能会有助于读者了解 MIDI 信息的功能：

a. 基本通道（Basic Channel）：表示开机时在哪一通道或是否能记住上次关机时的通道（Default）；以及可以设置哪些通道（Changed）。

b. 方式（Mode）：表示开电源时的“方式”（即是全通道“开”还是“关”（OMN1 ON OMN1 OFF）；单音（Mono）还是复音（Poly）。

c. 音符数（Note Number）：表示乐器能发送或接收的音域，常是键盘数。

d. 速率（Velocity）：表示能否发送或接收按键（Note on）和离键（Note off）时的速率速度，即力度的表示。

e. 触后（After Touch）效果：表示按下键后再改变力度能否有效果。

f. 弯音（Pitch Bender）：有无弯音效果。

g. 控制变换（Control Change）：该乐器能否接受或发送如颤音（Modulation），制音踏板（Hold），音量控制（Volumn），滑音（Potamento）等控制信息。

h. 音色变换（Program Change）：能否接受和发出音色变换信息，以及有多少种信息可以变换。

i. 系统专用信息（System Exclusive）

j. 系统公用信息（System Common）：如有无乐曲选择功能（选哪一首）或乐谱选择（从哪小节开始）功能等。

k. 系统实时（System Realtime）：分时钟（Clock）信息和命令（Command）信息，即是否能与其它乐器同步或接受什么时候开始或停止的信息。

l. 辅助信息（Aux Message）：用以处理规则以外的情况。

§10.4 计算机给音乐带来的变革

计算机的问世和普及应用不仅给人类的物质文明，而且给人类的精神文明带来极其深刻的变革和影响，是继产业革命中电的应用以后又一次更为巨大、更为深刻的社会变革，这种变革正在开始进行，其影响还正在扩大并不可估量。计算机的闯入音乐，我认为至少可对音乐产生以下几个方面的影响：

10.4.1 赋音乐以更广阔的天地

一直到现在，对音乐的传统的理解是由乐器声，即欧洲的管弦乐器、打击乐器或各地的民族乐器声，和人的歌唱声等组成的音阶、旋律、节奏、和弦、音律、调式、曲式等构成的体系，是一种听觉艺术。通过音乐可以传递和沟通作曲家、演奏者和听众的思想感情，得到美的享受和心理上的满足。而计算机音乐则冲破了传统的对音乐的认识，赋音乐以更广阔的天地。

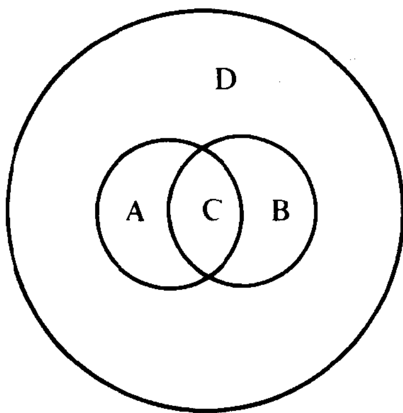


图 10-10 “声圈”

1）从传统的观念看，自然界有各种声响，人也可以发出多种声响，而音乐只是其中的一小部分，是可以用乐器或人声实现的、悦耳的、主要是由一定音高排列组成的旋律或节奏。而计算机的问世，原则上可以重现自然界的一切已有的声响，并且可以制造出自然界前所未有的声响。用图 10-10“声圈”示意，圆圈 A 是自然声响，圆圈 B 是人工声响。这二者的交汇处 C 是传统音乐区，而圆圈 D 是计算机可以实现的亦即可以用于计算机音乐的声响，比把 A 和 B 全部纳入还要大得多。

2）过去对音色的理解常常是以传统的乐器或人的歌唱声为依据的。即使是电子琴或早期的合成器，也主要是去模仿类似钢琴、长笛、小号、提琴等音色，而利用计算机的数字合成，已经出现根本无法用语言描述的无数种的音色，使音色趋于无限。

3）音律上也已经冲破了传统的五声、七声音阶和十二律、二十四律等，给实现无限的、任意变化的音律以充分自由的天地。

4）对自然声，如波涛声、流水声、蝉鸣声、鸟叫声，山崩地裂声等，还有其他效果声，由于可以方便地制作和贮存，已开始大量地用于音乐。

10.4.2 赋音乐以新的观念

计算机的渗入音乐，使许多传统的音乐概念都产生了变化，除了上述的对音乐范围的总体的认识以外，还有如：

1）对作曲的思想、方法和程序都会产生变革，例如有时可以从寻求新的合适的音色或节奏入手，而不一定从旋律的“动机”开始；可以实时地从合成器上听旋律、节奏或和声的效果，予以选择，而不是在“纸上作曲”或在“钢琴旁作曲”，而且，作曲家还可能取代演奏家。

2）音乐在织体上冲破了传统的分为打击乐、低音、主旋律、和声等几个部分，而予以新的构架。例如，以“宇宙声”、人声或自然声为背景，以节奏型作为“主旋律”，以特殊的效果声作为装饰等等。

3）对传统的和声学也一定会有突破，产生新的和声理论和效果。

4）音乐已不仅仅是一种艺术的范畴，而且也是一种技术的范畴；音乐不仅是一种艺术与心理的社会现象，而且是一种艺术与高科技结合的社会存在。

10.4.3 产生新的心理感受和审美标准

1）每当一种新的艺术形成出现，就会导致对原有审美观念的修改。计算机音乐也是如此，如对音色美，过去认为以丰满、柔和、圆润、清纯见美，现在可能加上新的因素，如怪诞、新奇等。如对旋律美，过去常常以悠扬、流畅为美，现在可能有新的因素如曲折、跳跃等，或者把旋律美的看重低于音色或节奏美。

2）有些听众喜欢某种合成器音乐的强节奏、高分贝，可是另一些听众则表示对此不能忍受。人们持有不同的审美观点也是合乎情理的。

3）正如一事物总是多彩的和相互渗透的，近年来在西方流行的有一类计算机音乐也有像传统音乐作品的夜曲、抒情作品那样，十分清新、幽雅、恬静，曲调优美，节奏性不强的合成器音乐，而传统音乐也有不少用合成器演奏，加强了节奏，改变了音色，显示出崭新的风格，照样风靡各地。

4）我们在本书的前面章节中已有描述，人对音高的听觉与频率是非线性的，即频率增为2倍，在听感上并不严格是高八度，特别在高音区和低音区有较大的偏离。这可能是历史上前期的音乐实践在人们生理上产生的痕迹。如果严格按倍频和分频制作的电子乐器（包括合成器）大量普及，会不会有朝一日，反过来觉得传统乐器的音高偏低呢？这也是可能的。

10.4.4 促进音乐研究的深化

除了前面叙述的，计算机的作用可以使人们对音乐理论及对音乐本质的认识和实验研究等更为深入以外，还出现了一系列的新问题，可以使对音乐的研究走向深化，例如：

1）如何去表现音乐？现有的乐谱显然是远远不够用的；如何说明音色？显然不能仅仅用一些描述的词句，而需建立在更科学的基础之上。

2）音乐如何进一步量化，是一个已经面临的问题了。用MIDI传递的数据信息常常可以分为64个、128个甚至256个量值，因此，仅仅用几个p或几个f或渐强、渐弱是不够表达的。

3）如何产生不同音色？到底有哪几个基本要素或基本函数？它们与主观听感间如何建立联系，也是要深人研究的，现有的种种说法是不能令人满意的。

4）计算机的应用可以促使人们更科学、更加从更细微处去研究音乐，而过去的研究多是笼统的、主观的。

10.4.5 促进音乐和音乐教育的普及与群众对音乐的参与

计算机音乐的出现，会大大有利于一般民众音乐水平、音乐素质的提高，有利于音乐的普及。人们从软件音乐进入“参与”音乐。

1）高质量的数字音源包括数字激光唱片在电台中的播放，以及家用音响系统的普及，特别是信息高速公路的实现，使人们可以不出门而欣赏到各种式样的优美的或合乎“胃口”的音乐，就一定能对人们音乐审美观念和欣赏水平的提高有所裨益。

2）简单而且价格不高的计算机音乐演奏系统的普及，使得在各种场合、各种业余团体和组织里都有能力置备，从而促进了音乐活动的普及。例如，“卡拉OK”的普及，克服了伴奏的困难，一定能而且是已经激发了普通民众唱歌的兴趣和提高了音准、表现力等歌唱水平。

3）不久以后，家庭中个人计算机一定会普及，利用计算机音乐教学系统可以随时方便地学习到音乐知识和练好乐器，而且作为高级的自娱形式，会促进一批人对音乐理论、作曲的学习和掌握。

4)计算机音乐促进了音乐院校学生以及音乐和音响界的从业人员对学习音乐物理的紧迫感。反过来，音乐声学或音乐物理和技术知识的普及也能提高的他们的音乐水平和专业水平。

10.4.6 促进音乐与科学技术及其它门类艺术的结合和计算机科学的发展

这表现在：

1）计算机促进了音乐与技术的结合。音乐的数字合成、数字录音、数字控制等就是很好的例子，音乐还将更加广泛起与高技术结合，如用计算机修复旧唱片等。

计算机也促进了音乐与数学，物理实验方法，环境心理学，动物、植物生长学，教育理论，智能开发理论，长寿学等的结合。

计算机还促进了音乐与其他艺术形式的结合，如音乐灯光，色彩音乐，用合成器为京剧、地方戏伴奏等。

2）音乐对计算机本身也有促进。例如MIDI的出现为计算机的技术的应用开辟了一个极广泛的天地。又如，音乐是产生于人的语言之前的，是一种能够传达人的思想感情的载体，对音乐本质及其心理效果的深入研究，必然会打开对于人类认识过程的进一步的认识，也会对人工智能的发展做出新的贡献。

3）计算机与音乐的结合还可能引发对一些哲学和人生的根本问题的探讨，如主体和客体的关系，客观究竟能不能完全取代主观等。

思考题：

1. 你对计算机给音乐带来的变革有何见解？

2. 从整个学科来说，你对计算机音乐的发展有何看法或展望？针对我国情况，你认为在近年内哪些方面的发展较有前途？

3. 如果你已经有了一台个人电脑或一台合成器，要组成一套最简单的MIDI系统，还需要些什么装备？

4. 你对利用计算机进行音乐教学的内容和前景有何看法？

参考资料：

1. Joseph Pinzarrone：在上海交通大学的讲学稿，1986。

2. 王新华：《计算机音乐：科学与艺术的宁馨儿》，《当代文艺思潮》，1987年第五期。

3. BOB. Moog：《MIDI乐器数字接口》，王启祥译，钱锋、龚镇雄校。

4. Roland："MIDI Guide Book" 4thed。
5. 龚文基：《数字乐器-过去、现在、未来》，《迷笛之声》第一期。
6. 一些乐器的说明书和演奏技法手册。
7. 《全国首届音乐物理、音乐心理研讨会论文集》霍宏、资民筠、韩宝强等人论文。
8. Proceedings of ICMC-94（国际计算机音乐大会）。
9. 龚镇雄："计算机音乐及其进展"，全国计算机艺术研讨会文集，1995。

第十一章　室内音乐声

§11.1　引言

11.1.1　同一声源的不同听感

从声源发出的声，不等于人耳听到的声。人们所听到的声音除与声源本身的性质和特点有关以外，还与环境条件、传播情况以及听觉的生理、心理状况等有关。你也许有过这样的实际体会：在一间小房间里从低到高地高唱音阶，在某个音上听起来比较响；在充满水蒸汽的浴室里洗澡时唱歌，你会发现你突然有了一付非常浑厚的好嗓子；在音乐教室里排练合唱时，觉得声音很大，效果很好，可是到台上演出就完全不是这种感觉了，使劲地唱，可声音也不显大，好像人们都哑巴了；如果在广场上演出，那更是喊破嗓子也听不见自己唱的是什么。有的人初到录音室录音，常常感到不习惯，觉得不是自己的声音，等等。

本章要讨论的问题是，从声源发出的声在各种不同的房间里或环境中传播以后的听觉效果。这里不讨论非音乐声，但包括与音乐声的传播和听感有关的噪声；也不讨论广场上的声音传播，但包括室内声传播的一般问题。

所以，本章所说的室内音乐声（Musical Sound in Rooms）主要讨论的是从声源发出的声在闭室内的传播情况，以及所形成的声场及造成的听感。

11.1.2　室内的音乐声源

室内音乐声的声源包括有以下几种：

1）人声或乐器所发出的音乐声。即人在房间里歌唱，在不用扩音系统的音乐厅里演出的独唱、合唱、乐器独奏或合奏，也包括自身带扩声器的电声乐器以及收音机、录音磁带或唱片的放音。有时，这是一个、二个或几个单个声源，有时声源是一片，但通常我们都可以用一个或几个点声源来加以处理。

2）通过传声、扩声系统，从音箱或喇叭里放出的电声。即从传声器接收后，通过电声系统加工或不加工，然后实时放出的歌唱或乐器演奏声。与前面所述的一些电子乐器或收音机、磁带放音一样，也属于电声。作为声源，不同的是，这里歌唱、乐器演奏本身同时也是声源，即人们既听到通过扬声器传出的声音，同时又听到直接的歌唱或演奏声，而且从传声器里播放出的声音又有可能回授到传声器里又为传声器接收，而成为一个反馈声源。

高级家用音响系统中的自动室内声场调控系统也属于这一种声源。

3）噪声或背景声（Background Sound）。这不是指音乐声中所包括的噪声，这里的噪声包括有：由于各种原因造成的室内噪声，有从室外传入室内的环境噪声和撞击噪声。即使传进来的是某种音乐，但并不是我们希望有的，也是噪声。另有为了改善听感或调节人的心理状态而制造出的人工噪声或背景声。

4）人工的声场控制声。为了制造出符合一定要求的声场或效果，或者为了改善室内整体或局部的音质，需要用电声技术或计算机技术制造出某些声源。这种人工控制的声源常常是

附加在自然声场或主声场上，而且与原来的声场叠合在一起，通常是固定录放，也有自动反馈的。实际上，上述的人工噪声和背景声也是一种人工声场控制声。

由上可见，这里涉及到扩音技术，录音技术，隔声问题，环境噪声，室内噪声和听觉生理等问题。

11.1.3 声在室内的传播

这是本章要讨论的中心问题。室内声在由各种声源发出以后，就要在室内传播，建立一定的声场。这里包括：

1）室内声的组成。包括直达声、各种反射声以及反馈声；

2）室内声场及其建立过程。包括声的衰减，室内声场的分布等；

3）描述室内声场的物理量。包括声强，闭室的混响时间，声能比，房间常数，混响半径等传统的声学量和近年来通过研究进一步提出的一些声学量。

4）影响室内声场的因素。包括房间的大小、形状，声源的位置和强度，吸声，室外、室内噪声和隔声等。

5）研究室内声场的方法。包括分析方法，统计（能量）方法，几何（声线）方法，计算机模拟方法等。

6）室内声场中音质设计的一般问题以及不同用途的房间室内声场的要求和设计。有音乐厅、歌剧院、电影院、录音演播室，还有一般家庭的小房间等。

由上述可见，这里涉及建筑声学，物理声学，吸声材料，室内声能，音乐电声，生理、心理背景等。

11.1.4 室内声的听感

这里包括：

1)对应于客观上建立的室内声场以及描述声场的物理量，有哪些描述听感的主观心理量，如响度、音色、空间感、清晰度、可懂度等。

2）影响听感的因素，如声的掩蔽、背景声等。

11.1.5 室内音乐声图解

现在我们把室内音乐声的有关问题用框图表示见图 11-1。

§11.2 室内声场

声波所到达的空间称为声场。声场中各处都有一定的声能。我们在本章中讨论的是闭室里的声场。

11.2.1 室内声组成

从声源发出并到达室内各处的声波，包括有直达声（Direct Sound）和从室内各处反射的反射声（Reflected Sound）。反射声又可以分为早期反射声（Early Reflected Sound）和混响声（Reverberant Sound）。

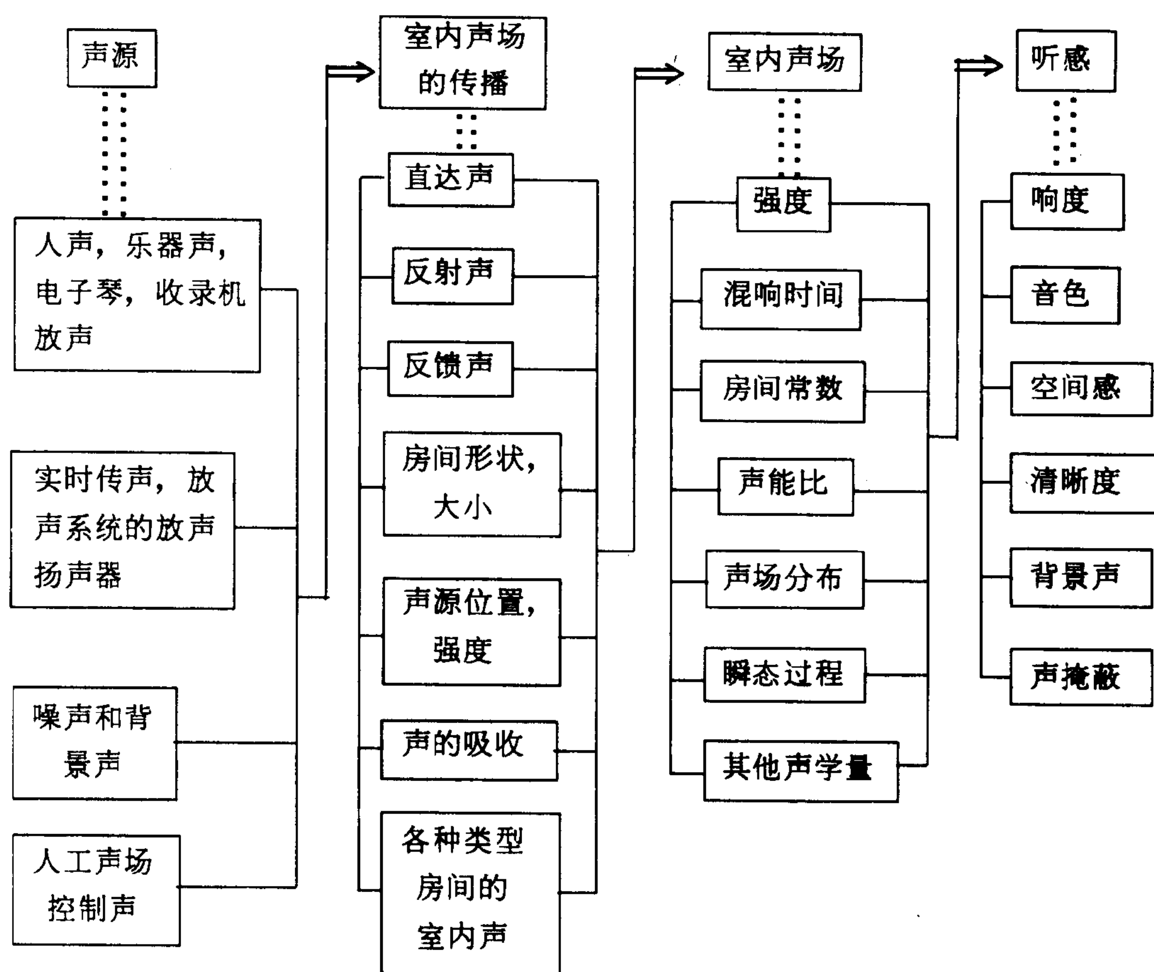


图 11-1　室内声学问题框图

早期反射声紧接着直达声而来，有时还把其中的一次反射声波单独提出来讨论。早期反射声常常起加强直达声的作用。早期反射声在仪器上可以清楚地检出，但听觉上常常与直达声分不开来。它一般在直达声之后 50ms 内到达，也有延迟到 100ms 甚至 150ms 的，这与房间大小和接收位置有关。音乐声中常常讨论的是 80ms 内的早期反射声。1851 年提出的哈斯效应（Haas Effect）指出前次反射声对于响度、明晰度、丰满度、明亮感等都有影响。对早期反射声的进一步的研究又表明，早期反射声中的侧向反射声对主观听感有很大影响。据报导，它的时间分布影响声音的听感的清晰程度和层次感，它的方向分布影响声音的空间效应，它的频率分布影响空间感和音色。侧向声的低频成分强，有好的空间感，而侧向声的高低频成分之比则影响音色。

混响声是从各个方向来的、以相同的概率到达每点的多次反射声。混响声中各个反射声波挨得很近，混响声延续的时间也较长。

图 11-2 所示的是到达室内一点 P 的各种室内声，是从一个点声源 S 发出的。图 11-2（a）是直达声，（b）是早期反射声，包括 1 是一次反射声，2、3、4…是二次、三次、四次反射声，（c）是混响声。图 11-3 表示从一个脉冲声源发出的声到达室内一点的先后和状况。

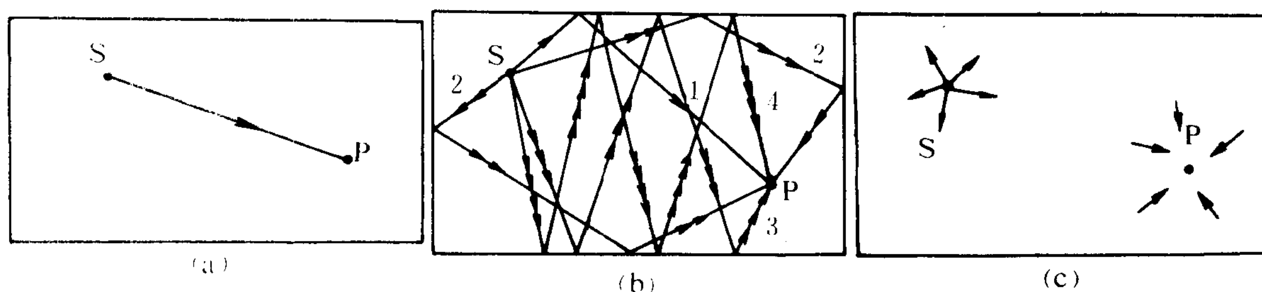


图 11-2　各种声的传播途径

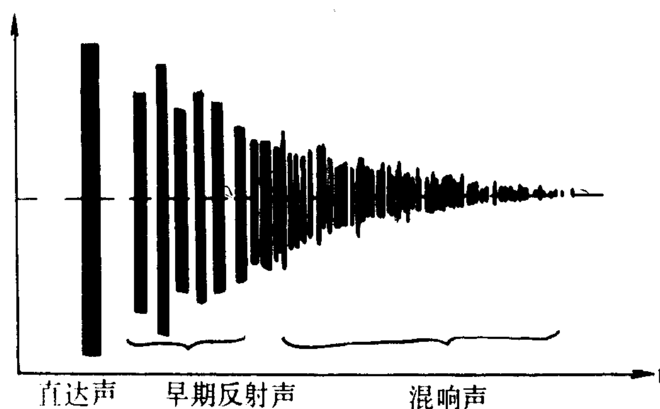


图 11-3　各种声到达的先后

11.2.2　室内声场的建立和衰减过程

当声源持续不断地以相同的频率和指向发出声能时，首先到达空间某点 P 处的是直达声，接着到达的是从各个方向的一次、二次反射声等早期反射声，接着是多次反射的混响声，使 P 点处的声能不断加强。过了一定时间以后，当被周壁和室内物体吸收的声能与声源发出的能量相等时，室内就形成了一个稳定的声场，如图 11-4 (a) 所示。如果声能被吸收的量大，则反射量较少，可以较快地达到稳定；反之，如果声能被吸收的量小，则反射量较强，达到稳态的时间就较长。

如果声源从某时刻 t_0 开始停止发声，由于各种声到达 P 点所需的时间不同，P 点的声能开始逐渐衰减。

声音在闭室内多次反射，可以形成驻波。在哪个频率上形成驻波则与房间的尺度有关。

11.2.3　闭室的尺度与简正频率

在闭室内能引起共鸣的，即形成驻波的频率叫简正频率。简单的情况下，认为简正频率与闭室的长、宽、高对应。简正频率：

$$f_0 = \frac{v}{2}\sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{B}\right)^2 + \left(\frac{r}{H}\right)^2} 。\qquad (11.1)$$

公式（11.1）中 v 是声速，L、B、H 是闭室的长、宽、高，m、n、r=0、1.2.…（但 m、n、r 不同时为零）。

最简单的情况是 m=1，n=r=0，则：

$$f_0 = \frac{v}{2L} \tag{11.2}$$

即：

$$L = \frac{1}{2}\lambda \tag{11.3}$$

式（11.3）中 λ 是波长（图 11-4（b））。

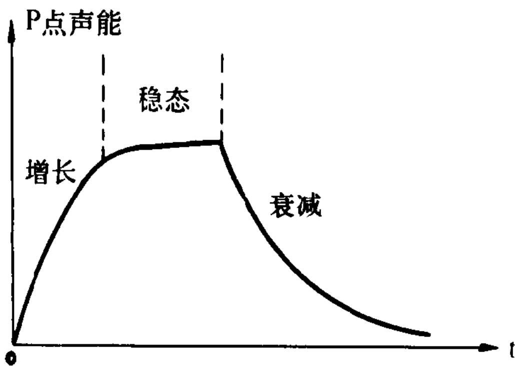


图 11-4（a）　声场的建立和衰减

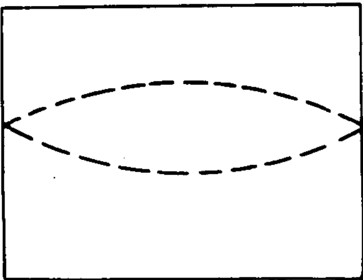


图 11-4（b）　室内形成驻波

下面列出在 L=10m，B=6m，H=4m，v=340m/s 的情况下各个简正频率 f_0 的数值：

m	n	r	f_0（Hz）
1	0	0	17.0
0	1	0	28.3
0	0	1	42.5
1	1	0	33.0
0	1	1	51.1
1	0	1	45.8
1	1	1	53.8
2	0	0	34.0
0	2	0	56.7
0	0	2	85.0
2	1	0	44.3
2	0	1	54.4
2	2	0	66.1
3	0	0	51.0
3	1	0	63.4
3	0	1	66.4

将上列简正频率列出声谱如图11-5。实际问题没有这样简单。从前面几个低频的情况可见，要获得好的低音效果则房间不能太小。

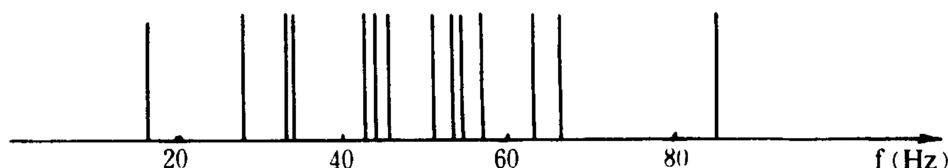


图 11-5 简正频率谱

各简正频率的间隔与L、B、H有关。房间设计要求L、B、H之比是无理数为好，不要整数，这样就不至于"着色"，即对某个频率的相对加强太过。

有些L、B、H的比例是被推荐的，如：

L:	B:	H:	
1.618:	1:	0.618	(黄金分割)
1:	$\sqrt{2}$: (1.414)	$\sqrt[3]{2}$ (1.260)	(根式比例)

11.2.4 闭室的混响时间 (Reverberation Time)

混响时间是声源停止发声后室内声场中的声能密度衰减60dB所需要的时间，记作T_{60}。衰减60dB就是能量变为初始的$1/10^6$（百万分之一）。

赛宾（Sabine）在1900年提出了计算混响时间的赛宾公式，即：

$$T_{60}=\frac{KV}{\alpha S} \tag{11.4}$$

公式（11.4）中V是闭室容积，α是平均吸声系数，S是房间的总表面积，K是一个与温度有关的量，常温下$K\approx0.163s/m$。

T_{60}与声源无关，与在房间哪个位置无关，即认为在扩散声场（见下节）下，房间里各处各处的声能一样。

后来，艾润（Eyring）于1930年又提出了艾润公式：

$$T_{60}=-\frac{KV}{s\cdot\ln(1-\alpha)} \tag{11.5}$$

当α很小时，即为赛宾公式。

考虑室内空气的吸收，得到努特生（Nundsen）公式：

$$T_{60}=-\frac{0.163V}{s\cdot\ln(1-\alpha)+4mV} \tag{11.6}$$

公式（11.6）中m是空气对声音的衰减率。如果m很小，可略去不计，即为艾润公式。

后来还有一些其它的计算T_{60}的方法。

11.2.5 最佳混响时间

经验证明，在各种不同用途下，对于不同容积的房间，有不同的最佳混响时间。努特生

和哈累斯（Haris）曾经给出如下经验图线（图 11-6）：

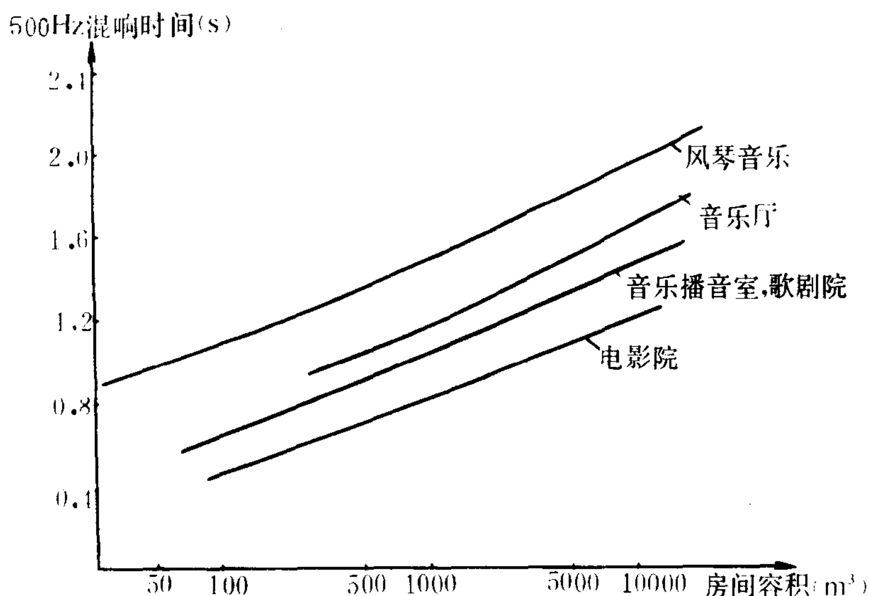


图 11-6　各类房间的最佳混响时间

最佳混响时间还与频率有关。图 11-7 给出的 T_{60}是相对值。低频时要求 T_{60}大些。

录音室或播音室的混响时间要求短些，厅堂的混响时间可以长些。多声道录音室和电视演播室要求混响时间短些，因为需多次录制，不要干扰，不要杂散声进来。还可以把一间房间隔成不同区域使用，不同区有不同的混响时间。

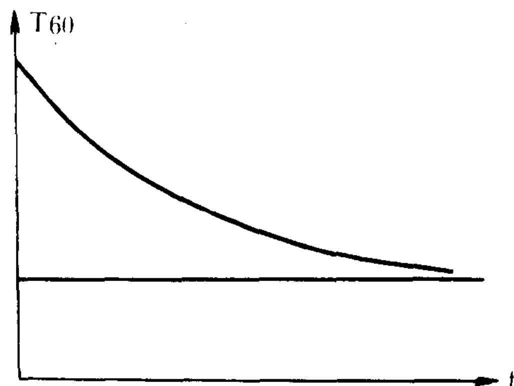


图 11-7　混响时间与频率

因此，多功能的厅室的混响效果是不好的。

混响时间要以一定短促的声源来专门测定。

11.2.6　其他描述室内声性质的参量

无疑，本世纪初赛宾提出混响时间 RT 或 T_{60}还是描述室内声场的最重要的参量。最近几十年内，国际上许多声学家们都在致力于找出更多的能描述对室内音质评价的宏观量来，提出了：

1）早期衰减时间 EDT（Early Delay Time），即从 0dB 衰减到－10dB 的时间，或早期混响时间 ERT（Early Reverb Time），即从 0dB 衰减到－15dB 的时间。实际上这段时间内主要是早期反射声。

2）重心时间 Ts（Point of Gravity Time）

$$Ts = \frac{\int_0^\infty tp^2 dt}{\int_0^\infty p^2 dt} \tag{11.7}$$

其中 p 是声压。

3）明晰度 C（Clarity）　$\int_0^\infty p^2dt$ 与声能成正比，下同。

$$c = 10\lg\frac{\int_0^{80ms}p^2dt}{\int_0^\infty p^2dt} \tag{11.8}$$

公式（11.8）表明这是基于早期反射声。早期反射声有助于加强直达声而提高听感的清晰程度，而混响声则起降低声音的清晰度的作用。

4）房间响应 RR（Room Response）

$$RR = 10\lg\frac{\int_{25ms}^{80ms}p_L^2dt + \int_{80ms}^{160ms}p^2dt}{\int_0^{80ms}p^2dt} \tag{11.9}$$

公式（11.9）中 P_L 是侧向反射声压。这是基于最近几十年的研究，表明早期的侧向反射声能对听感的空间感有重要贡献的一种数量表示。

5）侧向效率 LE（Lateral Efficiency）

$$LE = \frac{\int_{25ms}^{80ms}p^2dt}{\int_0^{80ms}p^2dt} \tag{11.10}$$

6）侧向能量因子 LEF（Lateral Energy Factor）

$$L = \frac{\int_{50ms}^{80ms}p^2\cos\theta dt}{\int_0^{80ms}p^2dt} \tag{11.11}$$

公式（11.11）中 θ 是声人射方向与两耳轴线的夹角。

7）双耳听觉互相关 IACC（Interatual cross-corelation）

$$IACC = \max|\varphi_{lr}(\tau),\ \sqrt{\varphi_{ll}(0).\ \varphi_{rr}(0)}\ |,|\tau| < 1ms \tag{11.12}$$

上式中 φ_{ll}及 φ_{rr}分别为左耳及右耳声信号的自相关系数，φ_{lr}是双耳声信号的互相关系数。

还有其他一些与频率有关的量。以上这些多数也还不是已被公认的。

有关报导认为，声透明性主要与 Ts、C、RT、EDT 有关，混响度主要与 ‘RT、EDT 有关，空间感主要与 L、LE、RR 及 IACC 有关，立体感主要与声压 P、IACC 和频率有关，在强声级下才能产生。

11.2.7　室内声场的频率响应（Frequeney Response）

一般说来，声场中的声波都包含有多种频率。音乐声当然是具有各种基频、谐波和分音的声波的集合。在闭室内，由于房间的尺寸、形状，会在声的传播特别是反射时，使某些频率的声波得到相对增强，而某些频率的声波则被抑制。另外，由于四壁材料、室内装饰和家具什物等对声的吸收也与频率有关，即会使某些频率的声波衰减得更快些。你可以做一个实验，在一间大厅里，甚至在城门洞里或者家里的房间里，最好是四壁反射较强的房间里，唱不同的音调，会感到对有些音高有比较强的共鸣。

传统的研究是把房间看成简单的直角长方体，而且认为声波只是沿与房间边长平行的方向来回反射，只对混响声作考虑。实际上，现代厅堂都不是规则的立方体，而是有许多异形的设计和装饰，而且，认为侧向的前期反射声对音质的作用很重要。因此，实际上闭室内的声场的频率响应是很复杂的，目前还是被探索的一个课题。

§11.3 闭室声场中的能量

11.3.1 扩散声场

如果声场满足以下条件，即为扩散声场：

1）声场中任何一点的声波是由从各个方向上，以相同的强度传来的声波叠加而成。这样，声场中各点的混响时间是一样的。

2）声场中各个方向传播的声波的位相是任意的。

3）声场中各点的声能密度，即单位时间内沿法线方向传过单位面积的声能是相同的。

扩散声场是一种理想的声场，它是均匀的、稳定的。上面讨论的混响声场即是一种扩散声场。在扩散声场中，如果声源以一定功率连续而稳定地发声，则各点混响声能是多次反射的叠加，由此可导出艾润公式。

室内声的音质与声场的“扩散”程度有关。

11.3.2 艾润公式和赛宾公式的推导

设声能平均反射系数为β，$\beta=1-\alpha$，α是平均吸声系数。

声波反射n次所需时间为：

$$t=\frac{nd}{v} \tag{11.13}$$

d是声波平均反射距离，v是声速。利用平均自由程的概念，有$d=\frac{4V}{s}$，V是房间容积（m^3），s是房间总表面积（m^2）。

经过n次反射后，声能：

$$\varepsilon_n=\varepsilon_0\beta^n \tag{11.14}$$

ε_0是起始声能，即声源停止发声时的声能。根据混响时间的定义，当$t=T_{60}$时，$\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_0}=10^{-6}$，即：

$$\beta^n=\beta^{\frac{v\tau}{d}}=\beta^{\frac{svT_{60}}{4V}}=10^{-6} \tag{11.15}$$

有：

$$T_{60}=\frac{4V\cdot\ln10^{-6}}{s\cdot v\ln\beta}=\frac{kV}{s\cdot\ln\beta}=\frac{kV}{s\cdot\ln(1-\alpha)} \tag{11.16}$$

公式中$\beta=1-\alpha, k=\frac{4\ln10^{-6}}{v}$。如取$v=340m/s$，则$k=-0.163s/m$。此即艾润公式。

当α很小时，$\ln(1-\alpha)\approx-\alpha$，则有：

$$T_{60}=-\frac{kV}{s\cdot\alpha}=\frac{KV}{S\cdot\alpha} \tag{11-4}$$

即赛宾公式。

11.3.3 室内声能比，房间常数，混响半径

这里再从能量的角度介绍几个表示混响状况的参数。

直达声到达房间内各点的声能密度 ε_D 随该点距声源的距离而改变，即：

$$\varepsilon_D = \frac{I}{V} = \frac{W}{4\pi r^2 v} \tag{11.17}$$

公式（11.17）中 I 是直达声的声能，W 是声源功率，r 是距声源的距离，V 是房间容积，v 是声速。

在扩散声场中，各点混响声的声能密度 ε_R 是相同的。

已知 n 次反射声的能量是

$$\varepsilon_{Rn} = W\tau\beta^n \tag{11.18}$$

公式(11.18)中 β 是反射系数，τ 是平均反射时间，W 是声源功率。利用 $\beta^n \to 0$，当 β 小时 $\sum_{i=1}^{N}\beta^n = \frac{\beta}{1-\beta}$，$\tau = \frac{4V}{s \cdot v}$，$\tau = \frac{\tau}{n}$ 及 $\alpha = 1-\beta$，有：

$$\varepsilon_R = \frac{1}{V}\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_{Ri} = \frac{4W(1-\alpha)}{v \cdot s \cdot \alpha} \tag{11.19}$$

上式中 s 是房间总表面积，v 是声速。

定义：室内声能比

$$Ks = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_D} = \frac{4\pi r^2}{s.\alpha} \cdot 4(1-\alpha) = \frac{16\pi r^2}{R} \tag{11.20}$$

房间常数（Room Constant）

$$R = \frac{S\alpha}{1-\alpha} \tag{11.21}$$

R 只与房间有关。

当 Ks=1，即直达声能与混响声能相等时，

$$r = r_0 = \frac{1}{4}\sqrt{\frac{R}{\pi}} \tag{11.22}$$

r_0 叫做混响半径（Reverbration Radius）。$r=r_0$ 的区域是一个球面。当 $r<r_0$ 时，直达声是主要的；$r>r_0$ 时，混响声是主要的。

§11.4 研究声场的方法

从前面所述可以看出，通常用以下各种方法来研究室内声场：

1）几何方法。这是像研究光线那样沿声波的传播方向画出直线。例如用在研究声的反射等问题上。

2）分析方法。这是先提出物理模型，然后用数学计算。例如室内声简正频率就是一个理想的驻波模型。

3）能量方法。通过研究声能的积累和衰减来研究声场。例如声能比、混响半径、房间常

数以及侧向反射声能等。

4）实验方法。任何上述理论方法都必须配以实验数据，因为所有声场都不是理想的、完全规则的，实际声场中各处声强、混响时间，包括空场和满场等，都是必不可少的数据。

5）计算机模拟和辅助设计。这主要用在声场的设计上，已经有通用的软件，专门设计各种房间的声场，改变形状、大小、材料等，都可以自动给出必要的参数。目前，这种方法用得越来越多。当然，这也离不开以实验为基础。

§11.5 吸声（Sound Absorption）

11.5.1 材料的吸声特性

闭室的混响时间和音质与房间容积、扩散条件及周壁材料和室内物件的吸声性质有关。

用吸声系数、吸声量和平均吸声系数来表示材料的吸声能力。

任何材料的吸声系数（Sound Absorption Coefficient）α 定义为被吸收的声能 E_a 与总入射声能 E_0 之比，即

$$\alpha = \frac{E\alpha}{E_0} \tag{11.23}$$

物体的吸声量

$$A = \alpha S \tag{11.24}$$

S 是物体的表面积。有时有些物体如人、花草、枝形挂灯等的表面积难以确定，就直接用吸声量来表示一个物体的吸声能力。

平均吸声系数（Average Sound Absorption Coefficient）

$$\alpha = \frac{A}{S} = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i \alpha_i}{\sum_{i=1}^{n} S_i} \tag{11.25}$$

材料吸声的能力与频率关系很大，图 11-8 中（a）是全频带吸声，（b）是中高频吸声，（C）是高频吸声，（d）是中频吸声，（e）是低频吸声。常常用 125，250，500，1000，2000，4000Hz 下的吸声系数来表示材料吸声的频率特性。

11.5.2 常见的吸声材料（Sound Absorption Material）

1）多孔材料。麻、棉、木丝、兽毛、玻璃棉、矿岩等纤维材料，加入适当的粘接剂制成板材或毡材等多孔材料，还有一些高分子材料可制成连孔形泡沫塑料，主要吸收高频声波。

孔中空气在声波作用下振动，产生粘滞性摩擦，消耗能量。

如在多孔材料的后面加一层空气，可以加强对声波的吸收作用。多孔材料的 $\alpha \sim 0.3$。

2）穿孔板材料。金属板、水泥板、薄木板或石膏板等上面穿一定宽度的圆孔，并在其后设多孔材料和空气层，构成穿孔板材料。图 11-9 中 a 是穿孔板，b 是孔，c 是多孔材料，d 是空气层。

板上孔中空气与后面物体组成了一个谐振系统，相当于一个亥姆霍兹振子。调整穿孔板、多孔材料或空气层的厚度及孔的大小，可以在一定范围内选择共振频率。

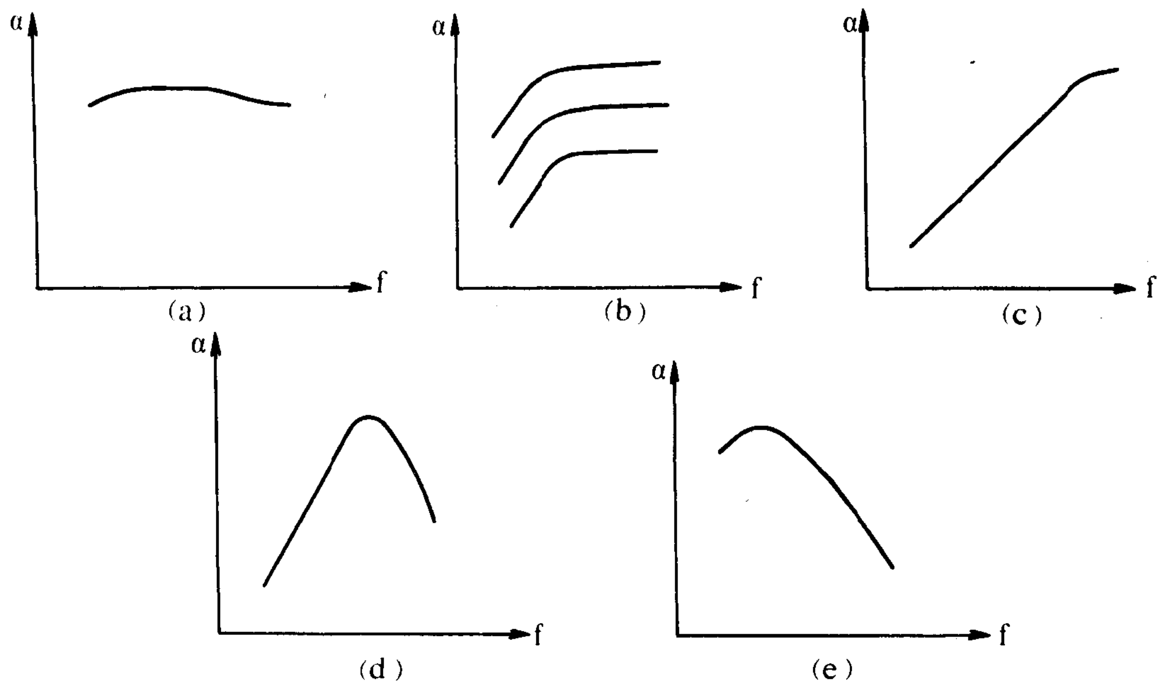


图 11-8 材料的吸声

石棉水泥穿孔板的 α～0.7－0.9。

3）共振板结构。胶合板、木纤板等有一定弹性的板，垫上海绵、毛毡等，钉在龙骨上，支在刚性墙上，做成共振板结构。图 11-10 中，a 是胶合板，b 是软垫，c 是龙骨，d 是空气，e 是刚性墙。

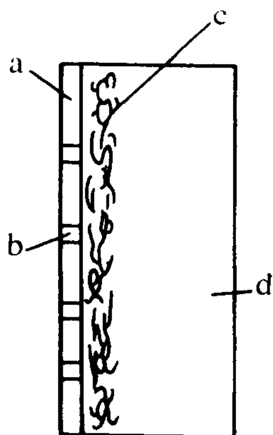


图 11-9 穿孔板吸声材料

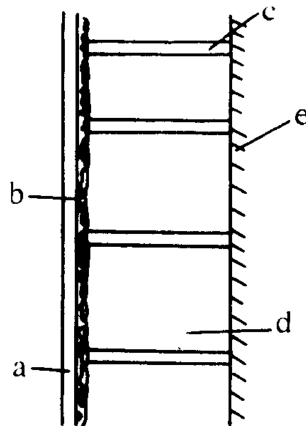


图 11-10 共振板结构吸声材料

这个系统有一定共振频率。调整面板的厚度、重量和空气层的厚度，可以调整吸声系数，常用于吸收低频。共振板结构的 α～0.5－0.6。

4）帘幕。用纺织品做帘幕。它本身是多孔材料。靠墙挂可吸收高频，离开一些则吸收中、高频。

5）吸声尖劈。常在消声室里、剧院里用。用尖劈打碎声波，有强吸声效果。

6）厅室里的人、家具等都是吸声材料。

§11.6　室内噪声，隔声

11.6.1　室内噪声（Room Noise）的来源

室内噪声来自室外和室内。来自室外的噪声有从空气中传入的空气声，如交通噪声，邻近地域的工业噪声，建筑施工噪声，学校操场、高音喇叭的喧闹声，商店、市场及街上嘈杂的人群声，还有从管道等物体的振动或由墙壁的传声而传入的固体声，如锅炉、空调机、洗衣房、通风管道、水管等振动或声响，隔壁的敲打、撞击甚至开关电灯的声音等。来自室内的噪声有剧场里人的走动声，观众的坐椅动作声，人声，翻看说明书、低语、吃东西等发出的声响，家用电器、时钟的声响等。

11.6.2　室内噪声标准

对于室内噪声的容许标准，原则上的要求是要使有用的信号甚大于噪声。因此，不同用途的房屋就有不同标准。下面列出几种房间内噪声大体的容许值：

播音室、录音室	25dB（A）
音乐厅	30dB（A）
剧院	35dB（A）
电影院	40dB（A）
办公室	50dB（A）
体育馆	55dB（A）
家庭	40dB（A）

dB（A）是A计数噪声级，是一种考虑了人的听觉特性的噪声计数标准。

11.6.3　常用的隔声和隔振措施

要减小室内噪声，除了压低室内噪声声源以外，还要采取隔声和隔振的措施。一般对空气声叫隔声（Sound Insulation），对固体声叫做隔振（Vibration Isolation）。

常用的隔声措施有：

1）选择音乐厅、剧院在远距闹市区，至少是远离大街；

2）减少建筑物内各室之间的相互干扰；

3）少开窗户；

4）用专用的厚重隔声门、隔音墙；

5）房间用双层结构或多层结构；

6）减小固体噪声等。

还有，像北京音乐厅还专门改造了地基，采用减震措施，以减少由地面传入的外界震动。

还专门修建了侧厅，作为隔离外界噪声的措施。

§11.7　室内声场的音质设计

11.7.1　室内声场音质设计的目的

对于室内音乐声来说，室内声场音质设计是为了达到以下几个目的：

1）得到尽量好的音质。这包括在厅室内各处都能听到较好的音色。音色应该是丰满的，或至少是不干瘪的；音感是清晰的，即能分辨出快速变化的、相继而来的音，有层次感，不拖泥带水，这常用透明度或清晰度来表示；具有一定的混响感，但又不含糊不清；具有一定空间感，即有如身临其境，有环绕感；还有立体感，即对声源的方向等有真实感。

2）弥补自然声场 的缺陷和不足。如增加响度；控制声场分布，以克服某些部位一次反射声的不足，达到声场均匀的效果；用延时等改善听感等等。

3）制造出特定的声场，并且可以予以控制和变化，作为研究用。这常常是通过电声的方法实现的这要比建立一个实际的声场方便而且经济得多。

11.7.2　室内声场音质设计的一般要求

为不同用途设计的室内声场有不同的要求，但不管是什么性质的厅室，有一些是共同的，即：

1）在厅室内各处，声音都要有一定响度，这包括使用和不用扩音设备两种情况。各处的响度要比较均匀，不能有“焦点”，即这些地方声音比起它旁边的点特别的强；也不能有“盲点”，即这些地方的声音特别弱于邻近点。

2）要有反射声存在，这才显得有活力，而且对各处的听众座席是均匀的。一般说来，若低频声的反射时间大于高频的反射时间，则声音听起来较为丰满，反之就较为干巴。但如果低频的反射时间太长，则会出现隆隆声（Bovming），听起来也不舒服。

3）直达声与一次反射声之间的间隙时间要小，使听起来不致有断续感。

4）要有一定的、合适的混响时间。混响时间太短，声音很单薄；混响时间太长，声音浑浊、模糊，不能保持一定的清晰度，听起来耳朵会“发痒”。

5）对于各种频率的声音都有较均衡的或按要求优化的反射，不要使某些频率的声音“着色”太重。

6）要尽量减少噪声，使各处的听众能听清尽量低的声响和感到尽量细微的变化。

11.7.3　室内声场音质设计的原则

室内声场和音质的设计应遵循以下几个原则：

1）在设计建筑物时必须同时考虑其室内的声学效果，切不可只顾建筑外观、装饰而全然不顾声学效果。常常有一些大会堂在视觉艺术上是上等的，但在听觉上是低等的；把一个文化活动中心盖成上下几层的天井构造，以致几个楼层内歌唱、练琴、舞蹈声音互相“打架”等。

2）对于不同用途的厅室有不同的设计要求，必须事先明确房间可能的用途，如体育馆是否可能兼作演出场地，电影院是否兼作音乐会演出，阶梯教室是否会上音乐欣赏课等，然后

作音质设计。在多种用途中，又要明确是以哪一项为主。

3）要利用电声技术。今天的电声技术已经可以弥补厅室里自然声的几乎所有缺陷，保真而不带“电味”，更可以大大地改善听感，还可以控制。电声一定要利用，要把厅室里的自然声设计与电声设计结合起来考虑，即使是不用扩音器的音乐厅，也应该作电声设计上的考虑，以使在需要的时候更好地改进音色。

11.7.4 室内声场音质设计的一般步骤

我们主要讨论与音乐声的传播和听感有关的声学环境，如音乐厅、歌剧院、录音演播室、试听室、家庭小房间等室内音质的一般考虑。

1）选择房间的尺度

房间的尺度大小要保证整个室内都能听到足够的响度。由于球面波声能的大小是与距离平方成反比的，因此房间太大了，传到远处的能量密度就小了。例如演出独唱的的音乐厅的容积一般不要超过 10，000m^3，演奏大型交响乐的音乐厅不超过 20，000m^3。像北京人民大会堂 90，000m^3 的容积，就非用电声不可了。

房间尺度也主要决定混响时间。混响时间大体与房间容积成正比，与吸声量成反比。满场的混响时间不要太低于空场的混响时间。考虑到经济等因素，每座容积对于音乐厅一般为 8—10m^3，歌剧院因要兼顾语言，为 6—8m^3，电影院为 4m^3。

房间的大小还要使听众不要离舞台太远，在视觉上产生隔离感，并会使视觉与听觉脱节。

2）设计房间的形状

房间的形状一般有矩形、扇面形、马蹄形，现在还有更多是异形的。顶棚也有平面、多面形或圆穹形等。

房间的形状设计要注意的是：使直达声都能到达每个听众座席。因此，观众席要做成斜坡状，要是地面完全平坦，直达声会掠过听众头顶；但做成斜坡后又不要有“阶梯效应”，即从每个台阶上反射的声响不致在哪一个频率或位置上引起过多的加强或减弱。

要有足够的反射声，并使反射声均匀地到达每个听众座席，这就要注意到侧墙的反射、顶板的反射和平台上反射板的反射等，使到达各处听众座席的一次反射声一般不大于 50ms，至多不大于 80ms。眺台如果过于伸出，会影响后排听众获得从顶板反射的反射声。需要时应采取电声来“补声”。

有许多声缺陷如回声、声聚焦等往往是与厅室的形状设计有关的。

3）考虑房间内的声扩散问题

声扩散是利用材料表面吸声或不规则形状、交错等，把声波“打乱”，使声场分布均匀，不产生回声或在某处有声聚焦等现象。

4）计算最佳混响时间

虽然，现时的研究表明，混响时间并不是决定室内音质的唯一参量，但还是最重要的参量，所以要根据房间大小，对于各类房间“最佳混响时间”的参考指标，房间内的墙壁、实物、人等“吸声量”来计算混响时间。

11.7.5 用电声技术进行室内声场控制（Acoustic Field Control）

用电声技术进行室内声场控制与用电声技术进行简单的接收、放大并通过扬声器传播到

室内听众的扩声不同。声场控制是指用电声技术对音质进行控制，使之产生所需的声场、音质或特殊效果。自然，在简单扩声中，我们也可以调整话筒的用法和位置、音箱的选用和位置等，谋求改变室内声场及其分布，但这不属于我们这里讲的声场控制。声场控制涉及声频工程、录音技术、建筑声学和音乐声学等许多学科和技术。

1）声场控制的类型

声场控制大体上分为以下几种类型：

a. 声场合成

这是指在消声室或具有高吸声处理的房间内，制造出所需要的特定的声场。具体地说，可以通过两种途径来实现。一种途径是多声道 声场合成 (Sound Field Synthesis)，即利用实时滤波器，先把反射声的有关数值输入计算机芯片的存贮器内，然后取用并调整其频率和时空关系。或者是利用声场处理器（SEP）实时控制直达声、一次反射声、早期反射声和混响声等，然后予以合成，制造出所需要的声场，以作声场研究、乐器研究以及音响设计等研究用。

另一种声场合成的途径是多声道声场重放（Sound Field Reproduction），即先用多轨录音机录下空间各点声音，然后进行重放。这主要用于录放音的研究及改善广播收听条件等。

b. 声场效果

这是上述声场合成技术在制造一定声场效果中的应用，即利用控制人工延时、人工混响等制造某种如厅堂效果，回声效果，叠音效果等效果声，控制左右声道声强差、时间差或位相差来控制声像位置及实现声像移动等。或者利用模拟房间容积的变化或墙壁吸收系数的变化以及声在壁面的反射角度等办法，控制反射声的时间结构，以达到不同的声场效果。这些适用在剧场、音乐厅、电影院中的声像移动，用环绕声加强临场感，使视、听同步，渲染和加强自然效果等。

c. 声场支援

这是指在已有的自然音响条件下，用电声手段弥补一些缺陷，增加一些效果。例如，改变剧场中前排座的反射声效果，增加侧向反射声，控制响度分布，增加混响感，改善声像定位，在扇形音乐室内增加空间感，在室外音乐厅中制造混响，控制早期反射声，为舞台上的演员增加返送声等。

2）扬声器的布置

在利用电声控制时，最后是要通过扬声器放声的，所以扬声器的数量、位置、方向、相互之间的搭配等都是很重要的，甚至是决定成败的。例如，一个极大的会堂，用集中的扬声器必然会造成前后排声音的不同，以致直达声和一次反射声产生严重的干扰，还有使听觉和视觉感受脱节，因此宜利用分散在座位上的小的扬声器群。又如，大的舞台和厅室必须有返送声扬声器，而不能听放送给观众的扬声器播出的从后壁的反射声等等。

§11.8 各种音乐场所的室内音质设计

11.8.1 音乐厅的音质设计

音乐厅一般是作为声乐和传统乐器演出的场地，包括独唱、重唱、合唱、独奏、室内乐以至大型交响乐器和管风琴的演出场地。在西方，到音乐厅去欣赏音乐被认为是一种高层次

的文化享受，要出很高的票价，要有出席正式场合的装束。音乐厅与一般的剧场的不同之处在于它的舞台空间与观众席是连成一片的，没有乐池，没有大幕，演出也不用电扩声系统。因此，对音乐厅的音质要求很高，对演出者的要求也很高。

古典的“鞋盒”式的音乐厅有较好的音响效果，其形状为矩形，宽度较窄，顶棚较高，四壁和天花板多为木质，声反射好。眺台浅，不影响大厅后座的音质。像每年元旦举行的演奏施特劳斯音乐作品的维也纳音乐厅的“金色大厅”就是“鞋盒”式的。根据近代声学理论建造的许多各种形状的剧院，演奏古典音乐的音质通常不如古典音乐厅。这被认为古典音乐大师们就是针对管弦乐队在这种音乐厅里的演奏效果而谱写音乐的。因此，近年来也多有“复旧”的趋势，如1971年美国建成的纽约肯尼迪艺术中心的音乐厅，1981年和1984年建成的日本大阪和福岛的音乐厅，1988年荷兰阿姆斯特丹音乐厅和我国的北京音乐厅等都有采用了“鞋盒”式结构。

在音乐声学上，这种结构之所以会有较好的音质是因为它有较长的混响时间，一般接近或超过2s。如波士顿音乐厅的中频混响时间为1.82s，大阪“Symphony”音乐厅的中频混响时间为2s，北京音乐厅的中频混响时间为1.4s。好的尺寸空间比也是它的音质好的原因之一，即天花板较高，这也保证了每座容积量较大，达8—10m^3。由于窄长形式则保证了早期反射声特别是侧向反射声丰富，也改善了音质。古典音乐厅内的许多雕刻、挂灯等装饰物也对声起了扩散作用，减少了回声等不良效果。

对音乐厅的声学要求还有：合奏效应，即演奏席上各处都要能传出较均衡的声音，不要使乐队中的某种乐器过于突出，这也是一种声聚焦的问题；乐队的声音融和，然后再传出去，这还与演奏席的形状，台上的顶部、侧向反射等都有关；还要求乐队队员能听到自己的和旁侧演奏者的声音，以便更加协调；演员还要能听清伴奏和自己的声音，不致脱节并造成心理上的影响。

下面是北京音乐厅（Beijing Concert Hall）的一些建筑指标：总容积10，400m^3，舞台面积175m^2，座位总数1182，听众席面积1164m^2，一层735m^2，二层285m^2，侧室144m^2，人均占有空间8.6m^3。混响时间为2.20s（125Hz）、1.60（500Hz）、1.45s（500Hz）、1.35s（1000Hz）、1.30s（2000Hz），1.00s（4000Hz）。

11.8.2 歌剧院的音质设计

歌剧院包括有西洋歌剧院、我国的民族歌剧院、各种传统戏曲的专门演出场地等。对歌剧院的音质要求除了与音乐厅有相似之处之外，还有一些特殊的要求。

西洋古典歌剧院与音乐厅的不同在于，场地较音乐厅更大，有专门的很大很高的与观众席不连的舞台，舞台一般有镜框式的台口，有乐池，观众席有许多包厢。专门演出京剧的也有很大的剧场，如上海以前的“天蟾舞台”等。

歌剧院大厅要求较长的混响时间，但比音乐厅短，因为歌剧还有道白，要兼顾语言声。演出京剧等地方戏曲的剧场混响时间要求更短些，因为这些都是单声音乐，要求更加清晰、响亮。

乐池的声学要求是：乐池内各声部要平衡，乐队不能成为一道“声障”，压倒或淹没舞台上演员的歌唱声。乐队顶上的天花板要有适当的倾角，以给前排观众以足够的反射声。

歌剧院还要求作适当的声扩散处理，避免回声的干扰。

目前一般歌剧院都考虑装有电声系统，应该使电声系统装得使听众觉察不到它的存在。

下面列出英国皇家剧院阿尔贝特大厅（Albert Hall）的一些声学指标：总容积 $V=36600m^3$，听众席面积 $S_A=3510m^2$，乐队席面积 $S_0=204m^2$，总面积 $S_T=S_A+S_0=3714m^2$，$V/S_T=23.2m$，座位总数 $N_A=6080$，$V/N_A=14.2m^3$，$S/N_A=0.58m^2$，500Hz－1000Hz 之间的平均混响时间～2.5s，直达声与前期反射声间隔 35.7ms。

11.8.3 电影院的音质设计

电影院的声音特点是，它使用的是已录制好了的重放声，所以不存在声反馈问题，但也有使各处观众看到的画面与听音同步的问题。因此，大的电影院单是用台前一组音箱是不够的。电影院重放的电声可以加人工混响，所以混响时间以短为好，但保持一定混响时间在听觉上可以有均匀感，一般维持在 1.0－1.2s。如果用环绕声，则混响时间还可以短些。

电影院里的噪声可以容许大些。

11.8.4 演播室、录音室的音质设计

在播音室和演播室里进行音乐录音和演播，对声学环境比一般音乐厅、剧院有更加严格的要求。

对于环境噪声，最好要控制在 25dB（A）以下，绝对不得超过 30dB（A）。因此一方面用厚重的墙壁、门扇或双层结构来隔声隔震，一方面用地毯、厚的帘幕、玻璃棉、甘蔗板等吸声，要用仪器检测，光凭人耳听感觉得沉静还不够。

混响时间要短，以避免多机录音时各声部之间的串扰。可以在后期制作时加入人工混响。

播音室里特别要注意避免或减少突出某些频率的“着色”现象，这样会使原来节目的频响平衡被破坏，而加入播音室的效果，使某些在房间里产生驻波频率的混响时间被拉长，导致声音失真，音色改变，拿到别的房间里去重放，即使用同一个扬声器也会有不同的听感。因此，有人建议录制音乐的演播室或录音室最好与实际演奏场地差不多大小，在演播交响音乐时，最好混响时间也差不多。由于大型乐队中有各种高、低音乐器，所以演播室中的吸声材料和物体的置最好是可移动或可改变的，如可以拉起的帷幕等。也可以把演播大厅变成两个区域，一个区域吸声小，适用于室内乐，另一个区域吸声大，适用于打击乐、电子音乐等。

在演播室里，回声也是绝对不能有的，直达声与一次反射声相差 35ms 以上，回声就会有干扰作用。

11.8.5 试听室的音质设计

试听室是用作音质主观评价用的听音实验室，它的面积较小，一般不超过 $100m^2$，小的试听室只有十几 m^2。要在这样的屋子里进行音质评价，要求混响时间比一般房屋长些，才能模拟大厅里的效果。因此四壁常用声反射较强的木板平面结构。试听室的隔声要求也很高，又要尽量避免和减少室内噪声，所以都用较好的隔音墙，隔音门和地毯等。

11.8.6 家庭小房间的音质设计

这是一个特殊的音质设计问题，但也是很实际的。当家用音响系统普及以后，这是几乎每个人都会碰到的问题。在一般情况下，房间的大小、尺寸是由已有的设计决定的，如果可

以在几个房间里进行选择，就已经很了不起的了。家用房间都比较小，环境噪声条件也是既定的。这样，家庭房间的音质设计大体上可以从以下几个方面入手，这里重要的是音响系统中音箱安放问题。

1）房间选择

如果你可以在几间房间里挑选一间放置音响系统，那么稍大一些的房间也许可以使低音得到较好的回响。同样面积的矩形的房间可能比方形的房间在音质的调整上会更容易些。

2）房间装修与布置

因为通过音箱放送的音乐是重放声，即各种效果都是已经制作好了的，所以房间里最好少一些混响的影响，也不要使某个频段被吸收得过多。地面铺上地毯，后墙挂上帷幕等等都是有益的。

3）扬声器的位置和放置

扬声器的位置是特别重要的，这在第九章《音乐电声》中已经讲过，这要由主要听音区在何处而定，要利用墙壁和地面效应。扬声器的高低位置最好与听音者的耳朵一致。扬声器安放的地方不要把振动吸收过大，也不要引起某个频率的共振。因此，以放在大件的坚实的基底上为好。如果有可能，用几个辅助小扬声器增加环绕声效果也有一些用处。除了音质效果以外，还要兼顾美观。放好后可以凭听觉调整，以听感好为准。有时稍稍挪动扬声器位置，音质就可以得到较大改善。

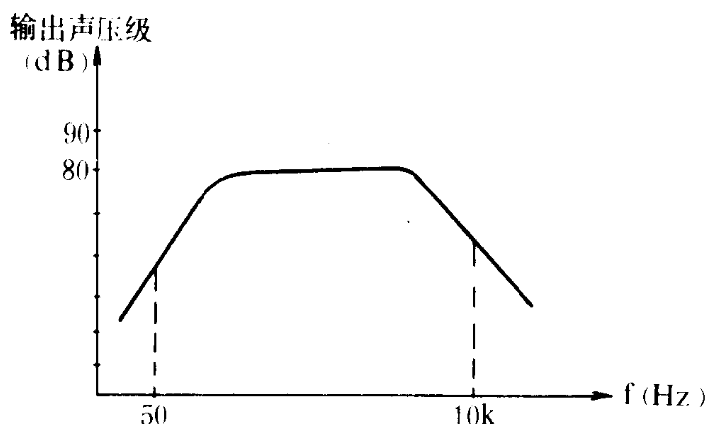


图 11-11 扬声器理想频响

4）由于房间的装修，物品的吸音或反射，实际上通过扬声器重放的音响效果绝不会是原来在消声室里所测得的频响曲线。图 11-11 是扬声器的理想频响曲线，而图 11. 12 所示是在房间里实测得的频响曲线。因此，有条件的话，可以用图示均衡器予以调整。图 11-13 是调整后的频响曲线。

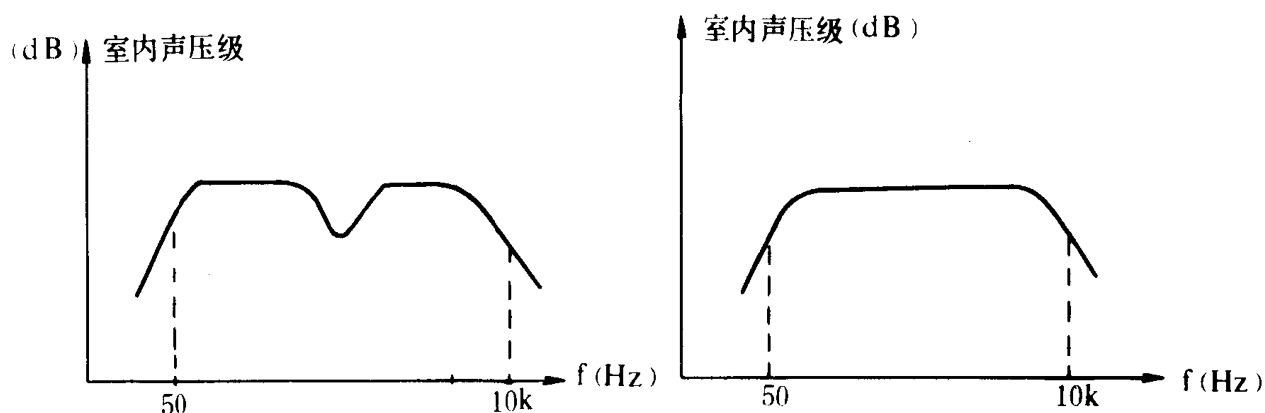


图 11-12 室内实测频响

图 11-13 调整后的频响

高级的音响系统有自动均衡功能。

5）现在钢琴已经进入许多家庭。钢琴放置位置的考虑，主要是后背离墙距离会对音质有很大影响，过分把钢琴贴墙对音量和共鸣都是不利的。木板地板会影响钢琴的音色，有时会使高频吸收减少。蒙在钢琴上的盖布、薄绒特别是较厚的毯子，会大大吸收钢琴的振动。

6）户外的噪声对听音常常起极大的干扰作用。窗户前挂上厚厚的帘幕会是有效的。

思考题

1. 根据你的理解，“室内音乐声”应该包括哪些种类的声音？

2. 计算一间长 6.7m，宽 4.2m，高 2.3m 的最低的 10 个简正频率。

3. 你家里放置音乐欣赏器材的居室里的室内噪声主要来自何处？

4. 注意一下北京音乐厅或其他影剧院的墙壁、天花板及舞台设施等，哪些是与声音效果有关的。

5. 混响对声音效果有什么影响？它决定于哪些因素？

6. 大房间与小房间的音响效果为什么不同？

7. 声音样品的录制为什么要在消声室里进行？在普通房间里录音有什么问题？

参考资料

1. Leo・L・Beranek；《Music Acousfics & Architecture》John Wiley & Sons Inc，1962 年版。

2. 管善群：《电声技术基础》（修订本），人民邮电出版社，1988 年版。

3. 马大猷：《环境声学》，科学出版社，1984 年版。

4. 马大猷、沈豪：《声学手册》，科学出版社，1987 年版。

5. 车世光、王炳麟、秦佑国：《建筑声环境》，清华大学出版社，1988 年版。

6. 吴硕贤：《音乐厅音质评价指标及主观心理、生理反应》，（《全国首届音乐物理、音乐心理研讨会论文集》），1991 年版。

7. 曹孝振：《音乐厅的空间环境、兼看柏林爱乐音乐厅》，同 6。

8. 梁华：《厅室声场的电声控制技术》，中国声频工程学会 1990 年会论文。

9. 包紫薇：《音乐、语言和播音室的声学》，中央广播事业局录音技术标准化学习班讲座，1979。

第十二章　音乐声的主观评价

§12.1　引言

12.1.1　音乐声的客观检测和主观评价（Subjective Apprasal）

在前面的章节中，我们已经提到过对音乐声声音质量的评价是既有客观标准，又有主观标准的；也介绍了乐器声、歌唱声、音乐电声以及音乐声在在厅室里的传播。要评价这些音乐声音质的好坏，在各个领域中，各有许多具体的客观技术指标，可以由仪器测定，但最终的判定，还是靠主观的听感。

常常有这种情况：对某一种传统乐器或电子乐器或者某一个音箱，客观检测的结果完全符合技术标准，甚至频响曲线的形状都是差不多的，但是主观听感却相差很大。

可以相信，即使是在将来，也无法用客观技术指标完全代替主观评价。

12.1.2　音质（Quality of Sounds）

音质即声音的质量。

音乐声的主观量有音高、响度、音色和时值四个要素，并有其各自对应的客观量。此外，由这些主观量或客观量还组成了高一层次的质量指标。对于每一种乐器或器材发出的声音或人的歌唱声，都有其特殊的声音质量指标，但归根结底，还是这几个要素及要素的组合。

从广义上说，声音的质量即音质，应该包括所有这音乐声的四个要素及其组合或派生的声音的质量。在有些地方，音质也狭义地作为音色的代名词。一般情况下，音质的主要内容是指音色的好坏，实际上，由于音乐声各要素之间的关联及相互作用，有时很难绝对地把几个要素的影响区分开来。

12.1.3　音乐声主观评价的特点

对于声音质量的客观检测来说，每一项都有具体的指标。但是，对于音质的主观评价，除了分项的指标以外，还有一个总体的听感，这是各种客观因素的综合效应，并还包含有音乐审美的内容。因此，音乐声的主观评价是**比客观评价更高一层次的评价**，这是音质主观评价的第一个特点。

由上述引伸一层，作为音乐声主观评价的第二个特点，即是：我们常常评价的是一首乐曲或一次演唱中的音乐声的音质，这已经不是一个单纯的技术，而是升华为一种艺术评价。

音质的客观检测一般是通过专业人员用仪器来实现的。但是，音乐声音质的主观评价，对于有些领域，如音乐电声器材或电子乐器或某些传统乐器，已经形成一些专业化的方法、术语或标准，由专业人员来完成，而这些方法、术语或标准还难以完全统一；然而在许多领域，还没有一套专门的方法和标准。此外，不管有没有专业标准，**每一位听众也将都是评判者**，都将会根据个人的好恶作出自己的评价，这是音质主观评价的第三个特点。

最后，无论是专业人员还是一般听众，由于各人的文化素质、教育水平、专业修养、个

人爱好、风俗习惯以及临场状态等等，都会对主观评价标准起影响，即会形成不同的评价标准。这是音质主观评价的又一个特点。

§ 12.2　音乐声的客观检测

上面说过，音乐声质量的客观评定是靠对各项技术指标的测定来实现的。许多技术指标不一定直接与音乐声的各个主观量相关，但终究是一个或几个主观量的反映。

12.2.1　与音高有关的客观量

反映音高的客观量有：

乐器的音域、音准；

音响系统或电声元件的频带宽度。在带宽之外的频率将不被保真地接收、调制或放大、输出，这但也将会间接的影响音色；

唱机或录音座的转速及其抖晃会影响音高，唱机的跳针严重时会损失一些音或音的一部分；

电子琴自动伴奏功能中的包括分解和弦在内的旋律音型的准确性，也是音高组合的一种表现；

通过测量频率的方法来判断音准，有绝对测量方法，即用各种频率计或计算机测量频率，也可以用比较法，即与某一标准频率比较，检验音高差多少。常见的乐器校音器如钢琴或吉他校音器，包含有各根弦的标准音高，然后根据指示仪所接收到的音比标准音高或低多少，作出反应再加以调整。利用拍频的方法对钢琴进行调音也是一种比较法；

在音高测量中，对于纯音即简谐波，很容易达到如七位或八位的较高的精确度；对于非正弦波，则如何测准其基频的音高至今还是被经常研究的课题，这里还包括基频与音高听感的关系。

12.2.2　与声强有关的客观量

涉及声强的客观评价量有：

不管什么乐器或歌唱或电声器材或音乐厅内的音响效果，首先要有一定的音量，包括最小和最大输出。传声器的灵敏度指的是接收的最小声强，这还与频率有关。输入阻抗和输出阻抗也会影响输出强度；

动态范围是声强的变化，衰减、传远也是声强的变化，震音的产生也是声强振幅的变化；

涉及声强均匀性的有左右声道的均衡，不同频率的均衡，左右声道的串音、交叉响应，歌唱的平匀性等；

指向性是声强分布的一种指标；

声强的测量一般是通过声级计来实现的，通常要求在距声源 1 米远的正前方来接收，或者根据需要在特定点接收；

在音乐声的传播中，不同频率的声的相对强度发生变化，会引起音色的变化；

信噪比可以理解为音乐声与非音乐声强度之比。

12.2.3 与时值有关的客观量

除了音乐声持续时间的长短本身以外，波形反映声音强度与时间的关系，而瞬态的波形又与音色有关；

频率与时间构成音高线，也即旋律线；唱机、录音座的转速问题也是与此有关的一个问题；

声音的混响实际是延时效果，声音的各种频率成分各自的混响时间的混合，会引起听感上音色的巨大变化；

声音的清晰度也是与其各频率的分量的延时长短有关的。

12.2.4 反映音色的客观量

一直认为频谱是反映音色的主要客观依据。共振峰是频谱的包络，反映乐器、歌唱的音质；

电声器材或元件的频率响应也反映音色的保真程度。传声器的接近效应也通过频响特性的变化反映音质。滤波特性也是一种频率响应；

失真问题，包括调制失真，谐波失真，交叉频响失真，串音，非线性失真，输入失真，阻抗不匹配引起的失真等，也都是通过频响或频谱的变化影响音色；

瞬态效应也是音色的一种客观依据；

信噪比除了如前所说可以理解为音乐声的声强与噪声的相对强度问题外，也可以理解为听到的总的声音质量问题。

§12.3 音乐美

在这一节里，我不去从历史上来介绍音乐产生、发展的几千年来众多的有关音乐美的派别和观点，也不去探讨诸如什么是美？什么是音乐的本质？什么是音乐美的标准或音乐美的特征？音乐美与自然，与社会及人类生活的关系等诸多哲学上的根本问题，也不去介绍当前关于音乐美学的几家主要流派及相互之间的争论，只想简单叙述一下作者关于音乐美的基本观点和内容。迄今为止，也还没有一本关于音乐美学的权威性著作。

12.3.1 有关音乐美的基本观点

有关音乐美，可以概括成为以下几个基本的观点：

1）音乐是音乐声的各种组合和运动，有自己本身的形式和构成，通过这些形式反应音乐的内在内容，各种音乐的技巧也正是音乐内容深化的表现，不能简单地称之为是形式主义。

2）音乐是自然规律和社会生活的反映。音乐是一种上层建筑，因此，也会对经济基础产生作用。

3）音乐作品表现作曲家和演奏（演唱）家的思想和情感，并最终把这些传达给听众，引起共鸣或联想，使人的感情升华。

4）美是客观事物的一种主观反映和心理感觉。美学就是审美学。音乐欣赏是一种内心的审美意向活动。根据以往的个人或社会的经验、传统或习俗等，已经树立了一些什么是美和

丑的标准和模式，包括心理感受状态，而音乐欣赏则是使这种审美经验得到满足。

5）音乐有感化、传递、深化、净化情感以及激励、教育、启迪、娱乐、休息、心理调节和医疗的作用。

6）美虽然有一定的客观社会、历史和传统标准，但也可以因人而异。

7）音乐美的内容和审美标准将随科学、技术、文化的发表而发展。

12.3.2 音乐美的内容

音乐美是有具体内容的，包括有：

1）旋律美

不同音高和时值组成音符的运动构成音乐的旋律。流畅的、或富有装饰性的、或快慢交替的旋律会给人以愉悦感。虽然有些国家或地区的人们欣赏音符的无规跳动，即旋律性不强的音乐（实际上这也是一类旋律），但包括我国人民在内的大多数国家的人民，还是喜爱接受旋律性或可唱性强的歌曲或乐曲，而使一些名曲的旋律能流传于世界各地而经久不衰。所谓音乐的优美动听常是指的旋律美。民歌的旋律来源于人民的生活，许多优美的旋律来自对自然的描写或作曲家本人的意念对自然、对社会以及对人们思想和心灵的写照。

2）节奏美

自然界的万物都是有节律的，从天体的周期运动，一年四季，一日的昼夜，海水的潮汐，生物的年轮，人的走路、呼吸、脉博、起居等等，无一不是。因此，人们向往和感觉节奏美是自然的。音乐中的节奏包括有强弱，拍子，一些民族、地区或音乐体裁的特定的节奏型和旋律节奏。

整齐的、强弱交替的行进节奏给人以振奋、向前和坚定的感觉。轻轻的拍打，配上徐缓的旋律，则传递平安、抒情和美的心声。

3）和声美

人们欣赏音乐，除了优美动听的旋律和错落有序的节奏以外，往往偏爱丰满谐和的和声效果。多声部的合唱、合奏，就要比单旋律感觉更为充实，完美。和谐本来是世界上万物存在的一个法则。如许多物理定律都有小整数的方次，特别是2；音乐也是如此，纯律比五度律和平均律更为谐和，因为它们的音程关系更满足小整数比，最和谐的八度的频率比就是2。大三和弦比小三和弦听感更为和谐，是因为它的各音的频率间有更小一些的整数比。音乐的美感常常不在于它们的对音高或调式，而在于其相对关系。宗教音乐和管风琴以其丰满的和声效果，仿佛声音来自天际，使人的心灵净化，飘然欲脱。

4）音色美

音色也是构成乐音的三个基本物理量频率、强度和时值的产物。实际上它也是与旋律、节奏和和声属于同一个层次的。一般来说，讲音色是否美，可以看它是清纯、清晰、明亮、丰满、圆润、柔和、甜美，还是模糊、浑浊、灰暗、单薄、粗糙、生硬、等等。当然，还可以有别的标准，而且对每个个人还有所不同。音色美在于谐波成分丰富。人们自然喜欢听一位著名的提琴演奏家或训练有素的歌唱家表演，而不愿意听从普通计算机里发出的乐音旋律，哪怕还是更为准确的。

5）结构美

每一首乐曲都是由音符交织而成的。严格遵从对位法而写出的赋格曲，就是以其严谨的

结构见美。曲式展示音乐在时间结构上的组合方式。配器是音色和旋律的穿插。音乐的织体包括着和声、配器、旋律、支声等各个方面的总体安排，形成一个立体交叉的“建筑构件”而富有活力和协调的美。“音乐的结构愈富有诗意的灵活表现力，就愈能鼓舞人”（舒曼）

6）运动和变化之美

如果你老是奏同一个乐音，老是有同样的强度，或者是维持不变的拍子或同一个和弦，你就会感觉单调，枯燥，以至厌烦，这就说不上音乐的美。音乐的美在于运动和变化。音高要变化才形成旋律。乐曲中有强弱的对比，音区之对比，快慢之对比，和弦之对比，调式之对比。对比就是变化。大调的歌曲中往往要用一些小和弦，小调的歌曲中往往要穿插一些大和弦。协和弦要从不协和弦“解决”后，才感到更有安定感。和弦的进行要有“动势”。曲子要有高潮，可以用和弦、速度（高潮时的速度一般是要慢些而不是快些）、强弱、伴奏等手法推向或衬托出高潮。流行歌曲用电声系统或计算机音乐系统伴奏，遵从严格的节拍，因而在唱法上常常用拖长、延后或超前某个音来打乱死板的节奏。普通电子琴之所以远不如钢琴富有表现力，就是因为不能随触键而改变其力度、自动伴奏的速度、强弱等，而显现出死板。颤音、滑音、琶音、装饰音的本身也在于变化。因此可以说，没有变化就没有音乐的美。

7）意境美

人们的欣赏一首乐曲或歌唱，除了针对其旋律、节奏、音色等单独因素之外，还着眼于其总体效果，即看其结构是否完美，声部是否融和，是否有真实感、临场感、空间立体感等。而且，音乐除了表现作曲家和演员的个性，即思想和情绪以外，还汇合了欣赏者个人的思想和情绪。音乐效果在欣赏者的心理中，已经不是具体的音乐符号，而是有了升华，形成了某种美的意境，或使你陶醉，或你兴奋，或你使有快意，或使你得到松弛，或令人愉悦，或使人忧伤。音乐可以使人一时超脱，摆脱人间世俗的名利、欲念，沉浸入天堂般的梦幻之中。也可以使人回忆、憧憬、深思或顿悟，或者得到激励、鼓动。而这些，都是音乐使你进入了某种心理境界，感受了意境美后才实现的。

以上极其粗略的表述了有关音乐美的基本观点和主要内容。这些，人们在音质的主观评价中自觉或不自觉的是会用到的。当然，这些只是笔者的一家之言。

§12.4 音质的主观评价

12.4.1 音高的主观评价

乐器发声或唱歌表演中音高的准确与否，是评价声音质量首要的和起码的一项。试想，不管你的演奏水平有多高，技巧有多熟练，歌声是多么清亮、圆润，但是五音不全，唱跑了调，或者是真正变成了脱离整个乐队的“独奏”，这就给人以极其不舒服的听感，大煞风景，把所有的美感全都打消了。而这一点不仅在业余的演出中，且在专业的演出中甚至是某些高水平的专业演出团体或专业演员中，也是屡见不鲜的。“一粒老鼠屎坏了一锅粥”，是特别要引以为戒的。

在乐器生产标准中，有主观听测音准这一项，作为客观仪器检测的补充。但是，在乐队临场演出时，音准与否首先是指挥的责任，而指挥之掌握音准，还首先在排练时的严格要求。但是，必须注意到由于各处气温不同，舞台灯光的辐射的影响，在演出前已调好的弦或对好

音的乐器会有失调发生，而且往往会偏差很大。

在演出过程中，还会因乐器使用后温度的变化等而使其音准失调，在临场发生的乐器的失准或唱歌的“跑调”，只能靠演奏者或演唱者自身随时调整，指挥也只能予以提醒而已。

乐器演奏或演唱长时值的音时，要保持音高稳定，这也靠听感来判定。由于频率与音高的不等价，在高音区听感偏低，低音区听感偏高，为求得主观听感的良好的音准效果，如钢琴的调音最终只能靠主观评价，而电子琴等严格按倍频及分频安排各个（八度）组音高的乐器，就不能有较宽的音域。

演出中的音准问题常常不被引起足够的注意。可以说，音高失准的演奏或走调的唱歌是一种对听众的不尊重。这个问题要靠提高演员的素质来解决。

当然，有控制的，或为了体现特殊的风格、乐制或效果的故意的音高偏离，则是一种艺术和技巧的表现。这完全可以与失准区分开来。主要判据之一是看结束音是否回到该调式的主要音上。因此，这也给演员临时因“跑弦”或“冒出”而出现的音高失准以很好的调整和弥补的机会。

12.4.2 声强的主观评价

声强的主观量是响度，通常讲的是音量如何。

首先是音量的大小。歌唱演员的歌声或戏曲演员的演唱必须在不用扩音设备的条件下让全场不费力的听到，这才谈得上欣赏和艺术享受。

音量的大小还要能够控制自如，这对演唱、乐器和电声都是一样的。

最大音量达到多少是听众喜欢或能接受的，对于各种不同对象有很大差别，甚至与民族、地区、年龄都有关。120dB 以上的某些摇滚乐队的演出在西方或我国有些城市的一定圈子的青年中是受欢迎的，而室内乐爱好者则会嫌它实在太吵了。

响度的均匀或均衡也是主观评价的一项内容。钢琴和弦乐器的低音区与高音区的强度要均衡，不均衡是常有的事，这往往是琴箱共鸣的问题。立体声音箱或喇叭的左右声道要均衡、可调，而且不串音。音乐厅、歌剧场里要保持各处声音均匀，这常常是要根据实际剧场效果，才能调整实现的。歌唱或者乐器演奏中长时值的音要能保持强度均匀。在合唱及合奏时各声部的强度要均衡。

在可闻声的频段中，保持各种频率段的声音强度的均衡也是重要的。有经验的听音者可以听出哪个频段的声强大了或者欠缺了，常常用“200Hz 附近鼓个包”或“500～700Hz 有个坑”来表述。对于各种不同的人来说，有人偏爱低音，有人则看重高音，有人追求的是中音的浑厚，这也可归属音色问题，但毕竟也是相对强度问题。高档的收录机或音响为此都有均衡器或均衡电路，有的可以自动调节。

在低声强的情况下，能听得见，听得清，层次分明，噪音小，这也是声强主观评价的一个项目。这对于唱歌和电声组合都是高要求。

频段窄，即高频和低频声没有了，这是劣质收录机的常见情况。

在不失真或少失真的情况下，声强的动态范围，即最弱与最强之间的跨度有多大，也是一个可以由主观评价的内容。

力度实际上反映声强的瞬时效应。

12.4.3 与时值有关的主观评价

在声音时值的主观评价方面，至今还未出现从快速演奏的声音的长短不足以建立音高的问题，以提琴或钢琴最快的指法演奏约每分钟1200个音符说，每个音符的时值也在50ms以上。音乐作品演奏或演唱的整体速度的快慢及其变化可以由听感来判定。除了有些体裁的音乐有规定的演奏速度，如迪斯科、波尔卡午曲等，或某一作曲家规定他的这部作品必须以某种速度演奏，此外，乐曲整体速度或速度变化的掌握在于演员或指挥家本人，而听者则更是从其总体效果及个人的感觉来评价其速度是否恰当。

没有经验的指挥、合唱队或演奏者，会掌握速度不稳，通常是越来越快。

在乐曲高潮处，常常会出现速度放慢的情况，这是符合心理上的要求的。

过于平稳、自始至终不变的速度将是枯燥乏味的。

演奏或演唱的力度或弹性问题，实际上是在一个音或一组音上使声音达到足够强度的时间问题。在传统乐器的演奏或演唱上，在很短的时间内发出足够强的声音，听起来“力度”就大；电声乐器或音响系统把音量开得大大的，也不等于力度大！

声音的“颗粒感”即每个音之间分开得很干净，不拖泥带水，也是每个音符的演奏时值很短又很均匀的效果。钢琴演奏时延音踏板的应用或电子乐器及电声调制中人工延时、人工混响的使用会遮盖这方面的缺陷。

演奏多声部乐曲、钢琴上的和弦或多声部合唱或重唱时的同时性，也是要靠主观评定的。

12.4.4 音色的主观评价

到目前为止，音乐声中最难以用客观检测代替的，也是最不好给予确定和描述的，是对音色的评价。虽然如此，人们在实践中积累了经验，还是可以用一些通常被使用的词汇来表达：

1）清晰与模糊。每个音不“拖泥带水”，也不是“分量不足”-乐器演奏的层次分明或歌唱发声的吐字清楚，是谓清晰。其反义词是模糊。

2）清纯与浑浊。清纯与清晰有些相近，但又不完全相同。清纯一般指歌唱、独奏或小重奏的高声部，要求每个音很干净、纤细，透明度高，有清澈见底的感觉，是谓清纯。其反义词是浑浊。

3）明亮与灰暗。一般指高、中音充分，听感明朗，开阔，不压抑，如阳光普照，满室生辉，有大三和弦的特性，是谓明亮。其反义词是灰暗。

4）丰满与单薄。谐波丰富，特别是中、低次谐波丰富，高次谐波也不过分突出，声部完美，铺垫宽厚，听觉温暖、舒适，富于弹性，不干瘪，似含苞待放的花蕾，是谓丰满。其反义词是单薄。

5）圆润与粗糙。主要用于评价歌唱或一些乐器演奏的声音。有光泽而不毛噪，精啄细磨，所谓“珠圆玉润”，有滋润感，优美动听，有光彩而不过分夸张，是谓圆润。其反义词是粗糙。

6）甜美与苦涩。甜美与圆润接近，但更富有青春感，更有活力，更有生气。高音成分更多些。整个和弦不那么厚但又不失之于单薄，像一位钟情的少女给你甜甜一笑，沁人肺腑，是谓甜美。其反义词是苦涩。

7）柔和与生硬。声音松弛不紧，如行云流水，不尖不锐，不突如其来，光滑细腻，悦耳

动听，高音不刺耳，低音不重浊，听感轻盈、舒服，犹如轻轻的抚摸，是谓柔如。其反义词是生硬。

8）当然，还可以用许多别的词来描述音色。如温暖、清澈、干瘪、优美、明朗、悦耳、刺耳、尖噪、有弹性……等等，到目前也还没有统一的规范。

12.4.5 音质的整体评价

我们评价一个音乐作品演奏或歌唱的音质，往往是在一首抑或至少是在一段乐曲或歌曲的演出中进行的，因此，实际上都离不开整体的评价。正如评价一个人，有时眉毛、鼻子单个看都长得很好，但放在一起却不好看；有时单个看五官不甚出色，但放在一起却很适宜。也有的人，长得很好，但总体的气质不佳；有的人不很漂亮，但很有风度，有味道。

形容音质总体状况的常有：

1）融合与松散。器乐演奏中每种门类如管乐器的各声部以至整个乐队，合唱中的各声部之间，独奏与协奏之间，唱歌与伴奏之间能很好地交融，浑为一体，乐器声部之间不打架，不离散，不闹独立性，主从分明，无论是协和还是不协和，都有整体感，是谓融合。其反义词是松散。

2）真实感与不真实。这主要是针对电声和电子乐器而言的。电声系统的高保真问题就是要求通过电声接收、放大后尽量保持声源的原来状态和特点，特别是要保留一些细微的声息，减少失真，如保留击键声、呼吸声、火车在铁轨上的挤轧声等，同时也不要加进一些什么。在作听音评价时也要更注意抓住这些细节，并在没有进行加工，如加人人工混响、人工延时等情况下进行听测。真实感的另一个问题是电子乐器产生的各种音色与被模仿的原型是否相像，即模仿的小提琴音色是否与真的提琴演奏相接近。关于这一点还没有一致的意见，有一种意见是电子乐器有自己独特的音色体系，只要求它自身的音色及整体感是好的，形成自己的风格特点，不必去拿传统乐器作为标准去考察它是否真实。真实的反义词是不真实。

3）空间感与没有空间感。厅堂声效果要求声音不仅来自舞台，因为这样会有单薄、不充实感。立体声效果要求声像位置基本正确并分布连续，不仅有展宽度，而且有纵深感。

4）临场感与没有临场感。临场感也是针对电声系统声音效果而言的，重放使人有身临其境之感。

§12.5 电声产品质量的主观评价

12.5.1 电声产品的声音质量

由于电在我们生活中占有越来越重要的地位，我们日常所听到的声音，特别是音乐声中，对于一般人来说，音乐电声常常占有主要的分额。听收录机、电唱机、组合音响、录音带，看电影、电视，欣赏一般剧场中使用扩音设备的演出，玩“卡拉OK”，奏电子琴……等等，人们听到的无不都是电声。

因此，对于录音机、收音机、音箱、电唱机、激光唱机、电视机的音响部分以及电子琴等电声产品，国际上以及我国国内都已经有一套成文的标准，对它们的声音质量作客观检测和主观评价。有的是只评价某个部件，如音箱、喇叭、耳机、功率放大器、效果器等，有的

则是评价整机或系统，如录音座、调频收音机、激光唱机等。

质量好的电声产品，应具备如下条件：第一是声源好，即录音带、唱片、电台播放的节目或收音机的接收部分质量要好；第二是传播过程中设备的质量好，即调制、放大等过程不会引起失真，不增加噪音等，有时还可以对声音信号进行加工，即加上人工延时、人工混响、降噪等，使音质变好，这些已在第九章中介绍过；第三是放声部分即喇叭、音箱的质量要好。

12.5.2 电声产品音质的主观评价方法

电声产品的音质主观评价要以一定的规定的方式、方法和程序进行。如电子琴的音质主观评价要由有经验的演奏家演奏，一些电声产品要用标准的“节目源”进行测听等。对于试听条件、人员、节目源的内容、评分方法等，都有具体的规定，有的已经有国家标准。

1）测听条件

电声产品主观评价必须在试听室里进行。试听室规定有一定的尺寸范围，混响时间要在 T_{60}=0.3-0.65（250-4000Hz）之间，在这个范围内偏离不大于25%。试听室频响要均匀，无明显着色，噪声小（<35dB），室内任何位置无不正常的回声、共鸣声等。

试听室内温度应在18-35℃之间，相对湿度在50%-75%之间。

被测的样机或样琴的放置方式，距后墙、侧墙的距离及放置高度都有规定。试听声级也有规定，在距声源1m处为70-90dB（A），视产品而定。

2）测听人员和测听方法

音质主观评价的测听人员规定应包括音乐家和熟悉音乐的有关科技人员，具有合格的听力，人数也有规定，不得太少，一般是5-10人。测听人员最好包括各种年龄，有不同经历和爱好的人。

测听人员在试听室里的座位与测听对象及四壁的距离都有规定，主要是为了使他们每一个人都处于室内声音均匀区。

测听人员必须隔着帘幕对样机或样琴进行测听。

测听方法可以是用一台标准样机，对每一台被测样机的每一项节目内容都一一比较，即由一台固定的样机或优质机放出标准（或参考）声后，立即与待测机相比较，或是隔一定时间听一次标准样机；或者是在待测机之间进行比较，选出相对好的产品。

测听人员必须保持良好的“竞技”状况，即身体、情绪方面无不适，且不能使耳朵过分疲劳，每测听过一件或几件样品以后要适当休息。

每位测听员要独立对各项测听指标打分或给出评语。

3）评分方法

过去沿用的是“去掉一个最高分和一个最低分”，求总平均的方法。这样做，因为测听人员一般是很少几位专家，既浪费了人力，也会使一些有较高评价水平的人反而被排除了出去。

按IEC标准建议，要对一个产品进行重复三次测听，这太费事了，实际上不可能做到。

已提出一种方法，在主观评价时，于一个单位评价时间（半天）内，把某一件待测样品随机重复一次，以每位测听员对这件样品两次测听中各个项目的评分的重复率，作为该测听员打分的“权”。这样就充分地利用了每一位测听员的测定结果，又公正地根据实际水平给予每位测听员一定的权重，克服了即使有经验的测听员也可能发生的临场测听水平发挥不正常的后果。这种方法的实际试行效果，证明是可行的。

12.5.3 电声产品音质评价节目源

节目源是一盘录音带，包括各种音乐声的内容，每段约 20-30 秒钟，经过精心选择，用以测听和评价不同情况下各种类型的电声音质。下面以我国国家标准“电声产品音质主观评价节目源标准’为例来说明。它含有：

1）男、女声朗诵。这是自己编选的一段基本上与汉语普通话各音素出现的概率相同的朗诵词。主要评价男女声的音色是否圆润、丰满，男声的力度、明亮，女声的柔和、清纯等。有人以“圆、厚、亮”三字概括语言声的好音质。

2）钢琴独奏。主要评价在一个较大的动态范围内声音的均衡，音色的清晰、明亮、结实、弹性和颗粒感等。

3）弦乐四重奏。主要评价层次是否分明，各声部间是否谐和，有否室内乐的空间感，弦乐演奏的起音特点等。

4）木管四重奏。主要评价音色的甜美，层次，真实感，整体和谐，能否听得出按键声、换气声等。

5）铜管乐。主要评价圆号的柔润，小号的清脆、甜美，长号的浑厚、有力以及整体场面的空间感、气势等。

6）管弦乐。主要评价大型管弦乐队演出的厅堂感、动态、气势，各种乐器的层次感，特别是其中打击乐的锣、鼓声等是否有原来的音色。

7）民乐。主要评价中、高频音色，各种民族乐器本来的音色特点，层次，空间感，其中打击乐如锣、鼓的力度、冲击感如何等。

8）打击乐。主要评价冲击力，弹性，颗粒感以及短音的瞬态特性。

9）电子乐。主要评价强音下的效果，力度，弹性，结实感，透明度，尾音，声像的立体感等。

10）男女声二重唱。主要评价声音的融合、明亮、柔和及细微处。

11）童声合唱。主要评价整体感，空间感，是否清脆、透亮、富于表现力。

12）戏曲演出。主要评价戏曲的吐字、发音特色，声音是否清亮，富有空间感，有“味道”。

13）火车声。主要评价真实感，能否听清车轮与铁轨的撞击声、挤轧声等。

14）钟声。主要评价整体频响上钟声的明亮、清晰、衰减等。

以上基本上囊括了通过电声器材可能放送的各类声音。国外有的还有一些自然声信号，如鸟叫、闹市的场景等。

除了以上音乐声以外，还有一些调整和检查讯号，如左右声道检查信号，极性检查信号，左、右声道平衡信号和声级调整信号等。

思考题

1. 你认为，随着科学技术的不断发展，音乐声的主观评价是否会越来越多地或全部被客观检测所取代？

2. 你对音乐美是怎样理解的？你的音乐美学其本观点是什么？

3. 你认为主观评价音乐最主要是哪些方面或哪些点？

4. 你认为描述音色的好坏应该用哪些术语?

5. 音乐电声的主观听音效果与哪些因素有类?

参考资料

1. 《电声产品声音评价用节目源编辑制作规范》(国家标准)。
2. 《电子琴音乐性能评价规范》(国家标准)。
3. 翁泰来:“近代电声测量的主要思路”。
4. 汉斯立克,《论音乐的美》,相业治译,人民音乐出版社,1986 年版。
5. 叶纯之、蒋一声:《音乐美学导论》,北京大学出版社,1988 年版。
6. 迈耶尔:《音乐美学若干问题》,人民音乐出版社,1986 年版。
7. 秦冲:《中国音乐美学史稿》,人民音乐出版社,1988 年版。
8. 龚镇雄、别敏:“科学技术的发展与音乐美”,《Proceedings of Sino-Japan Joint Meeting on Music Acoustics》,1994。
9. 龚镇雄、徐文学:“一种新的电声产品主观评介的评介方法,”《全国首届音乐物理、音乐心理研讨会文集》,1991。